



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TLUSTOVRSTVÁ TOPNÁ DESKA S REGULACÍ VÝKONU

HOT PLATE WITH POWER REGULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Lacika

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Búran

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Marek Lacika

ID: 186129

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Tlustovrstvá topná deska s regulací výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě práce zpracované v rámci semestrálního projektu, dopracujte kompletní návrh zařízení topné desky. Optimalizujte navržený tlustovrstvý motiv a pomocí simulačního programu sledujte přenos tepla. Tyto simulace proveďte následně pro celé zařízení. Při simulacích zvažte maximální provozní podmínky a výsledek experimentu vyhodnoťte."

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Búran

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá problematikou používaných topných dosiek a technológiou hrubých vrstiev. Teoretická časť diplomovej práce pozostáva z teoretického rozboru a popisu príslušnej technológie a používaných materiálov. Praktická časť práce sa sústreďuje na návrh výsledného zariadenia, ktorý tvorí návrh testovacieho a optimalizovaného topného prvku, prvotný konštrukčný návrh zariadenia a návrh modelov pre simulácie teplôt. Potom nasleduje popis výroby motívov a testovanie vytvorenej hrubovrstvej štruktúry na keramickom substráte. V poslednej časti sú zobrazené simulácie prestupu tepla v navrhnutom modeli zariadenia.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Technológia hrubých vrstiev, topná doska, motív, substrát, sieťotlač, simulácia ANSYS Workbench

ABSTRACT

This thesis deals with issues of used hot plates and thick-film technology. The theoretical part of diploma thesis contains a theoretical analysis and description of corresponding technology and usage of materials. The practical part of the thesis focuses on the design of the resulting device, which forms design of the test and optimized hot element, the initial design of the device and the design of models for temperature simulations. Then follows description of the practical realization of the motifs and testing of the created thick-film structure on a ceramic substrate. In the last part are shown simulations of heat transfer in the proposed model of the device.

KEYWORDS

Thick-film technology, hot plate, motif, substrate, screen printing, ANSYS Workbench simulation

LACIKA, Marek. *Thustovrstvá topná deska s regulací výkonu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127414>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Martin Búran.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinovi Búranovi za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce a ďalej chcem poďakovať Ing. Alexandrovi Otáhalovi, Ing. Josefovi Skácelovi a Ing. Lukášovi Novákovi za neoceniteľné rady a odbornú pomoc pri tvorbe diplomovej práce. Na záver chcem vyjadriť vďaku mojej priateľke a rodine za podporu po celý čas.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 TEORETICKÝ ROZBOR	9
1.1 Fyzikálna podstata tepla.....	9
1.1.1 Teplo a tepelná výmena	9
1.1.2 Matematický popis	10
1.1.3 Formy prenosu tepla.....	10
1.1.4 Jouleovo teplo	11
1.2 Hrubovrstvá technológia.....	11
1.2.1 Úvod do problematiky.....	11
1.2.2 Materiály hrubých vrstiev	13
1.2.3 Substráty pre hrubovrstvé technológie.....	17
1.2.4 Nanášanie a tvorba hrubovrstvej štruktúry.....	18
1.2.5 Výpal, sintrácia hrubých vrstiev.....	22
1.3 Topné elementy.....	23
1.3.1 Používané topné dosky.....	23
1.3.2 Typy topných elementov	24
1.4 Regulátory.....	27
2 NÁVRH ČASTÍ ZARIADENIA	30
2.1 Návrh motívu a použitý substrát	30
2.2 Návrh optimalizovaného motívu.....	33
2.3 Návrh modelu a teplotné simulácie.....	34
2.4 Návrh konštrukcie zariadenia.....	37
2.5 Návrh elektronickej časti.....	40
2.6 Voľba materiálov	45
3 VÝROBA TOPNÝCH ELEMENTOV	47
3.1 Čistenie sita a vytvorenie motívu.....	47
3.2 Sieťotlač a výpal pasty	49
3.3 Meranie a testovanie	53
3.4 Zahriatie testovacieho keramického substrátu	54
3.5 Výroba optimalizovaného motívu.....	57
3.6 Testovanie optimalizovaného motívu	58
4 SIMULÁCIE PRENOSOV TEPLA V ZARIADENÍ	61
4.1 Simulácia prestupu tepla pri položenej hornej platni	62
4.2 Simulácia prestupu tepla pri uchytenej hornej platni dištančnými stĺpikmi	63

4.3	Simulácia prestupu tepla pri uchytenej hornej platni odizolovanej od dištančných stĺpikov.....	64
5	ZOSTAVENIE ZARIADENIA.....	66
5.1	Topné telesá	66
5.2	Elektronická časť a DPS	67
5.3	Konštrukcia	68
5.4	Fáza testovania.....	69
6	ZÁVER.....	70
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	73
	ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK	76
	ZOZNAM OBRÁZKOV	77
	ZOZNAM TABULIEK.....	79
	PRÍLOHA A FILMOVÉ PREDLOHY	80
	PRÍLOHA B SCHÉMA ELEKTRONICKEJ ČASTI ZARIADENIA.....	81
	PRÍLOHA C DPS ELEKTRONICKEJ ČASTI	82

ÚVOD

V súčasnosti je možné pozorovať veľké využitie topných dosiek, resp. hot plate v širokej oblasti elektronického priemyslu. V tomto prípade možno zaradiť využívanie topnej dosky najmä do oblasti mikroelektroniky. Problematika týkajúca sa hot plate je spojená aj s výberom určitého topného prvku pre danú topnú dosku. V súčasnom období je veľká snaha realizovať elektronické obvody, čo najmenších rozmerov a najnižšej ceny, kde nachádza výrazné uplatnenie práve technológia hrubých vrstiev. Technológia hrubých vrstiev a s ňou získané skúsenosti boli hlavnou inšpiráciou k realizácii tohto zariadenia, ktoré dokáže nájsť v budúcnosti využitie v oblasti mikroelektroniky, prípadne pri predmetoch zaoberajúcich sa danou problematikou.

Táto diplomová práca sa bude zaoberať riešením a návrhom výslednej regulovateľnej topnej dosky založenej na hrubovrstvej technológii. Technológiu hrubých vrstiev možno vidieť pri použití v hybridných integrovaných obvodoch na vytváranie pasívnych, vodivých a odporových ciest, ale aj pri výrobe špeciálnych integrovaných obvodov. Táto technológia je výhodná predovšetkým kvôli lacnému a nevákuovému spôsobu tvorby vrstiev so špecifickými vlastnosťami. Je potrebné spomenúť aj jednoduchý spôsob výroby a ľahkú kombináciu s ďalšími elektronickými súčiastkami a obvodmi. V súčasnosti sa rozširuje ich využitie do špeciálnych a nekonvenčných aplikácií, ako sú optické displeje, solárne články, a aj v tomto prípade využitie v topných telesách.

Výsledné zariadenie topnej dosky bude pozostávať z tela konštrukcie, ovládacích prvkov a topných elementov. Telo konštrukcie bude tvoriť základnú časť hot plate, pričom na koniec k nej bude pripevnená horná platňa, ktorú bude možné oddeliť od tela kvôli vloženiu elektroniky a na spodnej časti konštrukcie budú nožičky zariadenia. Vo vnútri sa bude nachádzať elektronika na riadenie teploty na povrchu topného prvku. Zo spodnej strany hliníkovej platne pripevnenej na tele budú umiestnené topné elementy z keramických substrátov. Vedľa nich na povrchu tela zariadenia budú umiestnené otočný enkodér na reguláciu teploty a displej zobrazujúci aktuálny stav a nastavenú teplotu.

Prvá kapitola obsahuje teoretický rozbor súvisiaci s problematikou tepla a jeho šírenia, popis technológie hrubých vrstiev a používané typy regulácii. V ďalšej kapitole Návrh častí zariadenia je detailne popísaný návrh jednotlivých častí finálneho zariadenia hot plate. Nasleduje prvotný konštrukčný návrh zariadenia a vytvorenie modelu vhodného pre simulácie v dostupnom simulačnom programe. Následne sú zobrazené výsledky teplotných simulácií navrhnutých motívov a v samostatnej kapitole aj realizované simulácie prenosov tepla v celom zariadení. Ďalej v kapitole Výroba topných elementov je rozobratá praktická časť práce, dosiahnuté výsledky na jednotlivých topných elementoch, merania a záverečné testovanie. V poslednej kapitole je zhrnutý výrobný postup obsahujúci všetky jednotlivé technologické kroky, ktoré by boli použité pri praktickej realizácii finálneho zariadenia.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

Táto kapitola je zameraná na popis jednotlivých častí teórie danej problematiky. V prvej časti je definovaná problematika tepla – dôležitej fyzikálnej veličiny pre túto diplomovú prácu. Ďalšia časť teórie popisuje hrubovrstvú technológiu a jej realizáciu, ktorá zohráva majoritnú úlohu pri zhotovení topného telesa. V poslednej časti sú zhrnuté typy a možnosti používaných topných telies (hot plate) a vymenované ich parametre, cena a využitie. Nakoniec sú popísané možnosti a používané typy regulácií.

1.1 Fyzikálna podstata tepla

Teplo je vnútorná energia, ktorú prijme alebo odovzdá teleso pri tepelnej výmene inému telesu. Označujeme ho značkou Q , jednotkou tepla je Joule (značka J). Dôležité je rozlíšenie dvoch rozdielnych veličín: teplota vyjadrujúca stav telesa a teplo, ktoré udáva zmenu stavu daného telesa.

1.1.1 Teplo a tepelná výmena

Teplo je termodynamická veličina, ktorá vyjadruje zmenu vnútornej energie, pričom jej podstatou nie je práca ani tzv. chemická práca. Čiže ide o dejovú fyzikálnu veličinu popisujúcu termodynamický dej (postupnosť stavov systému), na rozdiel od stavovej veličiny, ktorá popisuje iba jediný stav. V prípade, že systém si teplo vymieňa (tj. prijíma alebo odovzdáva) s druhým systémom inej teploty, s ktorým nastáva tepelný styk, ide o tepelnú výmenu. Teplo opisuje procesy, pri ktorých prebieha veľké množstvo chaotických, neusporiadaných čiastkových mikropôsobení (zrážky jednotlivých častíc), ktoré nedokážeme priamo sledovať, či merať. Proces tepelnej výmeny vysvetľuje tepelne izolovaná nádoba s plynom, pričom plyn sa zmenou objemu zohreje. Pokiaľ ide o tepelne neizolovanú sústavu je možnosť teplotu plynu zvýšiť i ohriatím nádoby. V tom prípade dôjde k zmene teploty steny nádoby a častice, ktoré tvoria stenu nádoby, budú mať vyššiu energiu. Následne molekuly plynu s menšou energiou pri zrážkach so stenami nádoby časť energie prevezmú. Teplo je teda množstvo energie, ktorú pri tepelnej výmene odovzdá teleso teplejšie telesu chladnejšiemu. Ak teleso prijíma energiu vo forme tepla, stúpa jeho vnútorná energia. [1]

Z hľadiska kinetickej teórie sa pri výmene tepla odovzdáva energia pohybujúcich sa častíc neusporiadane. Teplo prúdi z teplejšieho telesa na chladnejšie, čiže v skutočnosti prechádza energia a mení sa na neusporiadaný pohyb molekúl látky (plyny) alebo zvyšuje kmitanie atómov v kryštalickej mriežke (tuhé látky) – zvyšuje, resp. znižuje teplotu látky. Tepelná výmena nesúvisí priamo s odovzdávaním častíc medzi jednotlivými systémami, zmenou ich chemickej podstaty, ani zmenami pohybového stavu alebo vonkajšej potenciálnej energie. Tepelné zmeny môžu byť formálne rovnaké určitej mechanickej práci alebo kinetickej energii častíc, avšak nie sú s nimi identické a fyzikálne sa podstatne líšia. Pri definícii tepla sa nevylučujú tepelné deje pri súčasnom vykonávaní práce. Kinetická teória premenu mechanickej práce na teplo a naopak, vysvetľuje ako premenu kinetickej energie usporiadaného

pohybu na kinetickú energiu neusporiadaného pohybu častíc a naopak. Tieto rozdiely sa názorne prejavujú v spektroskopii. [2]

1.1.2 Matematický popis

Výpočet množstva tepla Q prijatého fyzikálne a chemicky homogénnym systémom závisí na zmene teploty ΔT , pričom sa používa tento vzťah

$$Q = mc\Delta T, \quad (1.1)$$

kde m je hmotnosť systému, c je merná tepelná kapacita (konštanta) a ΔT vyjadruje rozdiel medzi koncovou a počiatočnou teplotou systému. [1]

1.1.3 Formy prenosu tepla

Prenos tepla nastáva medzi dvomi telesami (teleso a okolie) v tom prípade, ak medzi nimi vznikne teplotný rozdiel. Následným prenosom tepla sa zvyšuje vnútorná energia aj teplota atómov na mieste s nižšou teplotou, pričom prebieha dovtedy, pokiaľ sa teploty nevyrovnajú a nastane stav pod názvom tepelná rovnováha. Možno rozlíšiť tieto základné formy prenosu tepla:

a) vedenie (kondukcia)

Ide o najpoužívanejší spôsob prenosu tepla v tuhých látkach. Prebieha molekulárnym prenosom energie medzi látkami alebo ich časticami, ktoré majú rozdielnú teplotu a dotýkajú sa. V dôsledku rôznej teploty, vzájomnou interakciou medzi susediacimi časticami dôjde k prenosu energie s cieľom vyrovnania teploty. Ako príklad možno uviesť tyč s konštantným prierezom S a dĺžkou L , pričom konce tyče majú teploty T_1 a T_2 . Za čas Δt dôjde k prenosu tepla o veľkosti

$$\Delta Q = \frac{\lambda S(T_1 - T_2)}{L} \Delta t, \quad (1.2)$$

kde λ je merná tepelná vodivosť materiálu. Kondukcia kvantitatívne závisí od geometrických tvarov a rozmerov látok vedúcich teplo, od fyzikálnych vlastností a od rozdielu teplôt medzi ich časťami.

b) prúdenie (konvekcia)

K prenosu tepla konvekciou dochádza iba v plynch a kvapalinách. Ide o transport tepla pohybom molekúl, prípadne zhlukov molekúl v prúdiacej tekutine. Konvekcia spočíva v tom, že hustota látky sa s teplotou mení, a v dôsledku toho keď majú rôzne časti rozdielnú teplotu, prebieha prirodzené prúdenie a následne premiešavanie tekutiny, čím sa teploty vyrovnávajú. Najjednoduchším príkladom je zohrievanie vody v hrnci na sporáku. Podľa spôsobu, akým prúdenie vzniká poznáme konvekciu prirodzenú voľnú (v dôsledku rozdielnej hustoty tekutiny) a nútenú (umelý spôsob – čerpadlo, kompresor, ventilátor). [3]

c) žiarenie (radiácia)

Vyžarovanie je fyzikálny proces, kedy látka do priestoru emituje určitú energiu v podobe elektromagnetického žiarenia. Energia, ktorá je vyžarovaná žiarením závisí

na teplote telesa, farbe povrchu a obsahu plochy. Pri nižších teplotách sa realizuje prostredníctvom infračervených lúčov. Keďže nie je potrebná prítomnosť látkového prostredia, ktoré sprostredkováva prenos, ako jediné sa uskutočňuje aj vo vákuu (na rozdiel od prenosu tepla vedením a prúdením). Stefanov-Boltzmannov zákon definuje žiarenie tzv. absolútne čierneho telesa, kde σ je Stefan-Boltzmannova konštanta a v prípade, že dané teleso má teplotu T , tak z plochy S je vyžarované za jednotku času množstvo energie (výkon) [4]

$$P = \sigma ST^4. \quad (1.3)$$

1.1.4 Jouleovo teplo

V prípade Jouleova tepla ide o teplo, ktoré vzniká prechodom elektrického prúdu v danom vodiči. Jeho základnou jednotkou je joule (J). Zahrievanie samotného vodiča je možné popísať ako predávanie časti kinetickej energie častíc, ktoré podmieňujú elektrický prúd (elektróny) časticiam, ktoré sa nezúčastňujú na elektrickom prúde (kladné ióny v pevných pozíciách). Týmto dochádza k zvyšovaniu tepelného pohybu týchto častíc a vodič sa tak zahrieva. Veľkosť Jouleova tepla Q , ktoré vzniká vo vodiči s prechádzajúcim elektrickým prúdom I po určitú dobu t , na ktorého koncoch je napätie U (prípadne je známy odpor vodiča R) sa vypočíta takto:

$$Q = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t. \quad (1.4)$$

Tento vzťah sa taktiež nazýva ako Jouleov zákon. Popísané Jouleovo teplo nachádza využitie v tepelných elektrických spotrebičoch, v iných prípadoch väčšinou spôsobuje problémy, pretože zapríčiňuje straty elektrickej energie, prípadne spôsobuje tepelné poškodenie elektrických spotrebičov. [5]

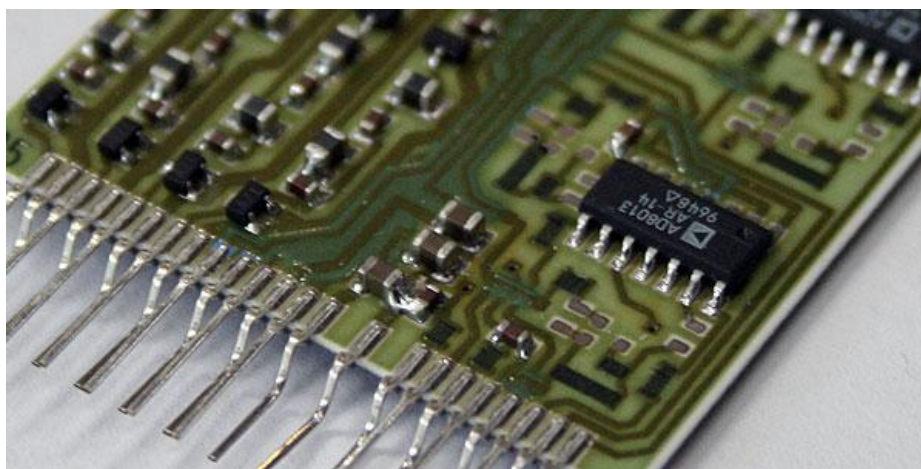
1.2 Hrubovrstvá technológia

Táto kapitola teoreticky popisuje problematiku technológie hrubých vrstiev a jednotlivých používaných materiálov pri danej technológii.

1.2.1 Úvod do problematiky

Počiatok rozvoja hrubovrstvých technológií ako rovnocennej metódy používanej pri realizácii dosiek plošných spojov sa datuje od roku 1942, kedy boli vyvinuté organické pasty na základe striebra. Neskôr približne v roku 1950 sa zistilo, že hrubovrstvými technológiami možno vytvárať aj dosky plošných spojov, čiže bolo možné úplne nahradiť fotolitografické procesy používané pri ich vytváraní. Najskôr však vznikali odporové pasty na báze striebra, oxidov medi a uhlíka, pričom ich elektrické vlastnosti boli nedostatočné. Prelom nastal až odporovými pastami na základe paládia, ktorým sa elektrické vlastnosti výrazne zlepšili. Tento krok bol základom smerujúcim k vzniku hybridných integrovaných obvodov (HIC – Hybrid Integrated Circuits). [6]

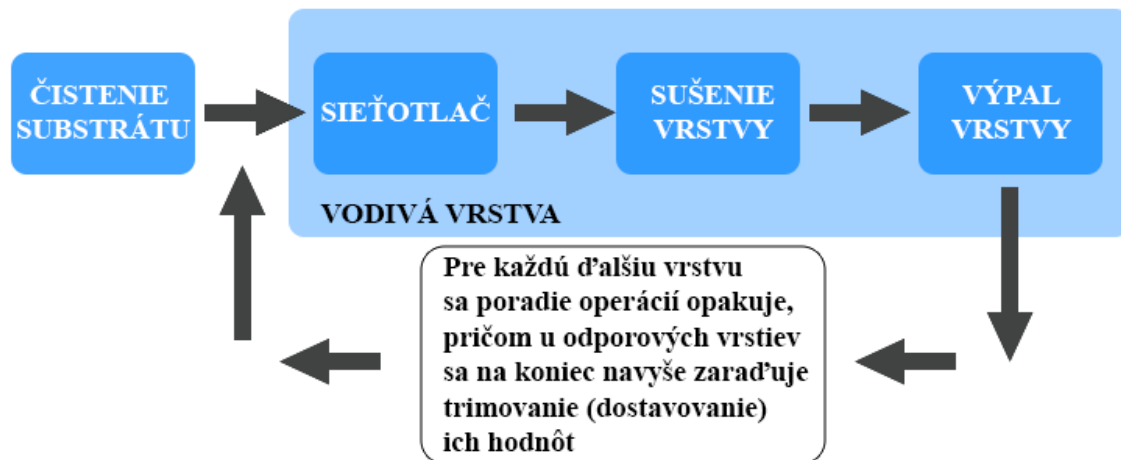
Vrstvové technológie, technológie hrubých vrstiev, ale i tenkých vrstiev boli v začiatkoch zamerané na použitie práve pri výrobe hybridných integrovaných obvodov (HIO). Technológia hrubých vrstiev sa používala v hybridných integrovaných obvodoch (HIO) na vytváranie pasívnych sietí, vodivých ciest, odporov a kondenzátorov. Jej využitie bolo viditeľné predovšetkým pri výrobe špeciálnych integrovaných obvodov, rôznych prototypov a malých sérií najmä v prípadoch a aplikáciách, pri ktorých nebolo možné použiť monolitické integrované obvody (viď príklad na obrázku Obr. 1). Medzi hlavné dôvody použitia technológie hrubých vrstiev patrí lacný a nenákladný, nevákuový spôsob tvorby vrstiev osobitných vlastností. K ďalším výhodám tejto technológie patria dobré elektrické a mechanické vlastnosti, jednoduchý spôsob výroby a jej ľahká kombinácia s jednotlivými obvodmi a elektronickými súčiastkami. Rozšírenie aplikačných možností v dôsledku nových technológií a zvyšujúca sa integrácia na polovodičových čipoch znamenala zmenu orientácie vrstvových technológií na využitie v nekonvenčných a špeciálnych aplikáciách. Tieto technológie sa využívajú v týchto prípadoch v oblasti aplikácií vojenských, vyžadujúcich vysokú spoľahlivosť, neobyčajné prevedenie, prípadne dlhú životnosť. Medzi tieto oblasti možno zaradiť výrobu fotografických prístrojov, v zdravotníctve (elektrokardiografy) a pod. V oblasti nekonvenčných aplikácií v súčasnosti najviac využívame hrubé vrstvy pri optických displejoch, solárnych článkoch, topných telies, ďalej ako vysokonapäťové izolácie, supravodiče na vysoké teploty, antény pre rôzne čipové karty, piezoreproduktory, rýchle hrubovrstvé poistky a najmä rôzne senzory. [7]



Obr. 1 Využitie technológie hrubých vrstiev [8]

Vrstva materiálu, ktorej hrúbka je aspoň desaťkrát väčšia ako stredná voľná dráha elektrónu v danom materiáli je hrubá vrstva. Ide o hrúbku v desiatkach mikrometrov. Hrubovrstvou technológiou je možné vytvárať odporové, vodivé aj dielektrické vrstvy a prekovené otvory. Táto technológia nám umožňuje kontaktovanie a lepenie čipov bez puzdra na substrát z keramiky, no tiež aj spájkovanie súčiastok určených k povrchovej montáži. Súčasti hrubovrstvých technológií sa vyrábajú najčastejšie využitím sieťotlače, kde je špeciálny materiál v podobe pasty nanášaný na keramický substrát. Následne prebieha výpal tejto vrstvy pri teplote približne 850 °C, charakteristickej hrubovrstvej technológii. Hrúbky vrstiev po výpale sú približne

o dva rády vyššie ako pri tenkých vrstvách, čo znamená rádovo v desiatkach mikrometrov. [9]



Obr. 2 Technologický postup hrubovrstvej technológie [10]

Prehľadne znázornený technologický postup vytvárania hrubovrstvej štruktúry je na obrázku Obr. 2. V prípade použitia viacerých typov odporových pást, prípadne aj pri realizácii štruktúr s viac vrstvami je možné procesy sieťotlače s následným sušením vrstvy niekoľkokrát opakovať. [10]

1.2.2 Materiály hrubých vrstiev

Hrubovrstvú štruktúru možno vytvoriť hrubovrstvými pastami. Pre realizáciu pasívnych sietí v elektronike sú tieto materiály dodávané v stave pást (inks), ktoré majú definovanú viskozitu. Pri pastách hovoríme o heterogénnom termodynamickom systéme s viacerými zložkami s rozličnými fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami, ktorý má oddelené povrchové rozhranie. Hrubovrstvé pasty sú charakteristické tixotropnými vlastnosťami, pričom v závislosti na mechanickom pôsobení sa mení ich viskozita. Hodnota viskozity je v procese sieťotlače nepriamo úmerná tlaku stierky. V dobe odskoku sita, kedy nastáva prenos pasty na keramický substrát, viskozita dosahuje najnižšiu hodnotu. Viskozita hrubovrstvých pást je v rozsahu hodnôt 50 až 80 Pa.s a ich zloženie tvoria tri základné zložky:

a) funkčná zložka

Táto zložka určuje charakter pasty a tvoria ju častice drahých kovov (vodivé materiály) alebo častice dielektrických a sklenených frit (izolačné materiály). Zloženie tejto zložky pri odporových materiáloch závisí na danom odporovom systéme, ktorého základ tvorí zmes drahých kovov alebo oxidy. Veľkosti častíc funkčnej zložky sú rádovo v mikrometroch, pričom ich veľkosť musí byť dostatočne malá voči veľkosti oka sita.

b) tavivová zložka

Tavivovú zložku tvorí sklenená frit, ktorej cieľom je vytvoriť medzi funkčnou zložkou a substrátom väzbu. Aby vznikla nosná matica na funkčnú zložku, pri realizovanom výpale musí dôjsť iba k mäknutiu nie k roztaveniu. Z toho dôvodu sa pre tavivovú zložku používajú nízkotaviteľné sklá s teplotou mäknutia už od 600 °C.

c) pojivová zložka

Tlačové vlastnosti pasty zabezpečuje pojivová zložka, ktorú tvoria organické látky napr. terpineol, butyldiglykolacetát a i. V postupe tepelného spracovania sa táto zložka odparí a na výslednej konečnej funkčnosti vrstvy sa nepodieľa. [11]

Súčasťou používaných pást môžu byť i modifikátory vlastností, ktoré pozmeňujú viskozitu systému (zmáčadlá, oxidy či zlúčeniny).

Materiály používané v sieťotlačových pastách možno rozdeliť do týchto skupín:

- vodivé,
- odporové,
- dielektrické a izolačné,
- špeciálne.

Drahé kovy pre vodivé pasty sa používajú ako funkčná zložka najmä kvôli svojej stálosti a odolnosti voči vplyvom okolia. Pri odporových materiáloch je hodnota odporu nastaviteľná pomerom vodivej (kovovej) a tavivovej (sklenenej) zložky. Funkčnú zložku dielektrických pást tvoria materiály pre keramické kondenzátory a u izolačných pást rozličné typy sklenených frit. Predpripravené funkčné zmesi zaraďujeme do skupiny špeciálnych pást ako sú napríklad: termistorové, magnetické, luminiscenčné, piezoelektrické, pre zobrazovacie prvky a topné telesá, tieniace a pasty pre chemické senzory. [10]

Vodivé pasty

Funkčnú zložku vodivých pást tvoria prášky drahých kovov, ich zmesi a prípadne zliatiny (AuPd, AuPt, Au, AgPd). Druhý kov slúži na úpravu výsledných vlastností vrstvy, napríklad znižuje celkovú rozpustnosť v spájke (najmä pri Au) alebo môže znižovať elektromigráciu (hlavne pri Ag). Systém na báze striebra je charakterizovaný veľmi dobrou vodivosťou a je dobre spájkovateľný (výborná zmáčanlivosť). Teplota výpalu sa pri vodivých pastách pohybuje v rozsahu od 760 °C do 1000 °C, záleží od typu pasty (odporúčené výrobcom). V oblasti hrubovrstvej techniky možno vodivé pasty používať na kontaktný systém rezistorov, prepojovaciu vodivú sieť, spájkovacie plošky, plochy na lepenie polovodičov, senzory a iné nekonvenčné aplikácie (tienenie a antény). [12]

Tab. 1 Prehľadne uvedené vlastnosti materiálov vodivých pást [10]

Základ pasty	Zlato	Paládium striebro	Paládium zlato	Platina zlato
Typický odpor [Ω/□]	0,005	0,03	0,05	0,05
Schopnosť spájkovania	Nie	Výborná	Výborná	Výborná
Kontaktovanie drôtom	Výborné	Priemerné	Dobré	Dobré
Kontaktovanie tlakom	Výborné	Priemerné	Dobré	Dobré
Cena	Vysoká	Nízka	Vysoká	Vysoká

Pri materiáloch pre vodivé hrubé vrstvy sú požadované nasledujúce vlastností: dobrá vodivosť (0,002 až 0,15 W/□) a adhézia, musia poskytovať spoľahlivý základ na pripojenie drôtového vodiča, pasta musí poskytovať dobrú eutektickú maticu, spájkovateľnosť s veľmi čistým spojom, stabilné a konštantné vlastnosti počas procesu výroby, dobrá presnosť tlače a rozlíšenie natlačených čiar, dobré tlačové vlastnosti a dlhá doba životnosti (viď Tab. 1).

Základné funkcie, ktoré majú vodivé pasty sú prepojenie súčiastok, ukončenie rezistorov, sú vhodné pre diskkrétne súčiastky (kontaktné plochy), je možné ich použiť ako elektródy hrubovrstvých kondenzátorov. [10]

Odporové pasty

Odporovými pastami je možné realizovať hrubé odporové vrstvy typu cermet, ktorého základom je kombinácia práškového vodivého pigmentu a sklenej boritokremičitej frity. Požadovanú hodnotu odporu dosiahneme voľbou koncentrácie vodivých častíc v heterogénnom systéme. Tým je ovplyvnené aj usporiadanie vodivých častíc v sklenej matici. Výpal prebieha pri teplote 850 °C počas doby výpalu 60 minút. Samotná kvalita a reprodukovateľnosť vlastností odporových vrstiev závisí práve na dodržaní technologických podmienok, predovšetkým na teplote (± 1 °C) a dobe výpalu. Typické vlastnosti niektorých typov odporových pást sú zobrazené v tabuľke Tab. 2. [12]

Tab. 2 Typické vlastnosti odporových pást [10]

Vlastnosť	Fyzikálna jednotka	Materiál		
		Pd-Ag	RuO ₂	Ruteničitany
Plošný odpor R_p	Ω	10–10 ⁵	1–10 ⁷	10–10 ⁷
Rozptyl odporu po výpale	%	30	10	10–25
Teplotný súčiniteľ pri – 55 až + 125 °C	K ⁻¹	300.10 ⁻⁶	300.10 ⁻⁶	50–250.10 ⁻⁶
Napäťový súčiniteľ	V ⁻¹	150.10 ⁻⁶	400.10 ⁻⁶	– 19.10 ⁻⁶
Teplota výpalu	°C	850	980	850
Doba výpalu	min	60	45	60

Pri odporových pastách je dôležité splnenie nasledujúcich požiadaviek: široký rozsah hodnôt vrstvomého odporu, stabilita odporových hodnôt (najmä pri zvýšených teplotách), nízky teplotný (TCR) a napäťový (VCR) súčiniteľ odporu, dobrá reprodukovateľnosť parametrov na rozdielnych substrátoch, nízky šum a kompatibilita s vodivými pastami. Základom moderných odporových pást sú kyslíčníky rhutenia, iridia a rhenia. Tieto kompozície sú málo citlivé na zmenu teploty v priebehu výpalu v porovnaní s klasickými cermetovými pastami, pričom majú aj lepšie hodnoty TCR a stabilitu. [10]

Dielektrické pasty

Z pohľadu využitia v oblasti HIO možno dielektrické pasty rozdeliť do troch skupín. Jedná sa o pasty na vytváranie kapacitorov, pasty na izoláciu krížiacich sa vodičov

a pasty slúžiacie na krytie a puzdrenie pasívnych sietí (najmä rezistorov). Základné materiály, ktoré sa používajú na realizáciu dielektrika kondenzátorov sú stabilit, rutilit a negatit. Tieto materiály sú charakterizované nízkou hodnotou kapacity, nízkym stratovým činiteľom a minimálnou teplotnou závislosťou. Materiály na základe báze rôznych sklovín ($\epsilon_r = 5-10$), ktorých stratový činiteľ je závislý na frekvencii (0,01 až 0,005 pre stovky MHz) sa používajú na izoláciu medzi krížiacimi sa vodičmi. Vrstvy materiálov určených na ochranné (krycie) účely sú realizované na báze nízkotavných bezalkalických skiel. Požiadavky na ich vlastnosti sú nízka permitivita a dobrá homogenita. Všeobecne základnými požiadavkami na dielektrické pasty sú vysoká elektrická pevnosť, dobrý izolačný odpor a nízky stratový činiteľ. V nasledujúcej tabuľke Tab. 3 sú uvedené základné vlastnosti používaných systémov dielektrických pást. [12]

Tab. 3 Vlastnosti dielektrických (izolačných) pást [10]

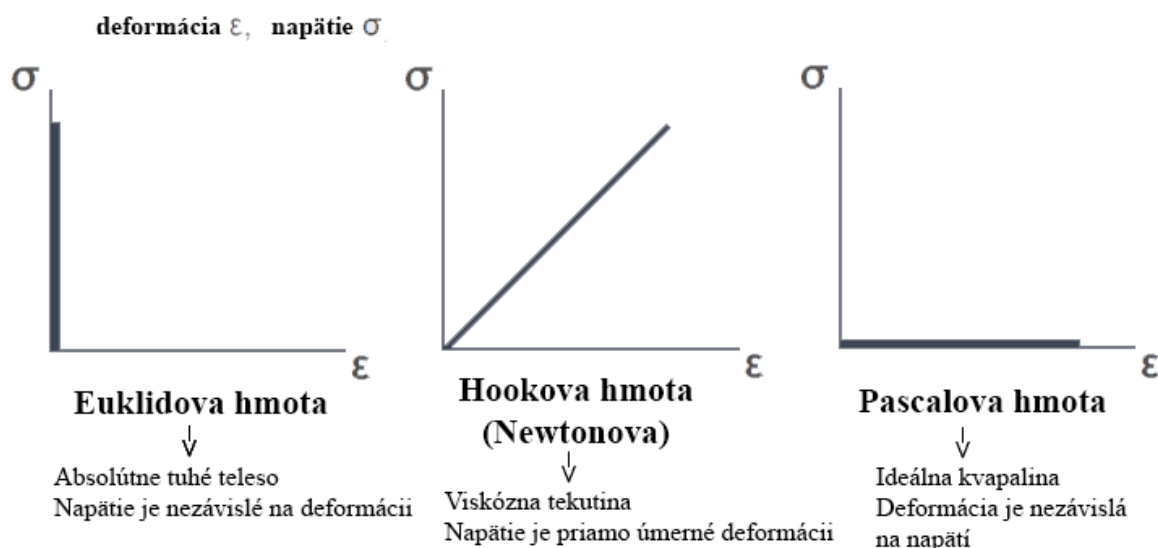
Parameter	Fyzikálna jednotka	Materiál pasty		
		Jednoduchá sklovina	Rekrytalizačná sklovina	Sklo-keramika
Hrúbka vrstvy	μm	37–50	37–50	37–50
Relatívna permitivita ϵ_r (1 kHz)	–	6–9	10–20	11
Stratový činiteľ $\text{tg } \delta$ (1 kHz)	–	0,005	0,005	0,005
Činiteľ akosti	–	500	1000	–
Izolačný odpor (meraný pri 100 V)	Ω	10^{11}	10^{11}	10^{13}
Elektrická pevnosť E_d	$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	8,5	11	20
Teplota výpalu	$^{\circ}\text{C}$	875	850	850
Doba výpalu	min	60	60	45

Pri príprave pást je dôležité, aby boli zaručené dobré tlačové vlastnosti a po nanosení a výpale aj homogenita pasty. V dôsledku toho sa pasty pripravujú miešaním a roztieraním jednotlivých súčastí v práškovej forme s čo najlepšie určeným tvarom jednotlivých častíc (priemer menší ako $5 \mu\text{m}$). [11]

Ďalším dôležitým pojmom súvisiacim s hrubovrstvými pastami je reológia. Ide o náuku o toku a plynutí, resp. je to veda skúmajúca časovo závislé tokové a deformačné procesy v rôznych materiáloch. Reológia definuje, že za určitých okolností všetky materiály tečú. Z toho dôvodu bolo zavedené Deborino číslo

$$D = t_{rel}/t_{obs}, \quad (1.5)$$

kde t_{rel} je relaxačná doba príslušného materiálu a t_{obs} je doba pozorovania. Daný materiál vyzerá tekutejší, čím je Deborino číslo menšie. Číže reológia modeluje a skúma deformačné vlastnosti jednotlivých látok. Vlastnosti sú charakterizované na nasledujúcom obrázku (viď Obr. 3). [10]



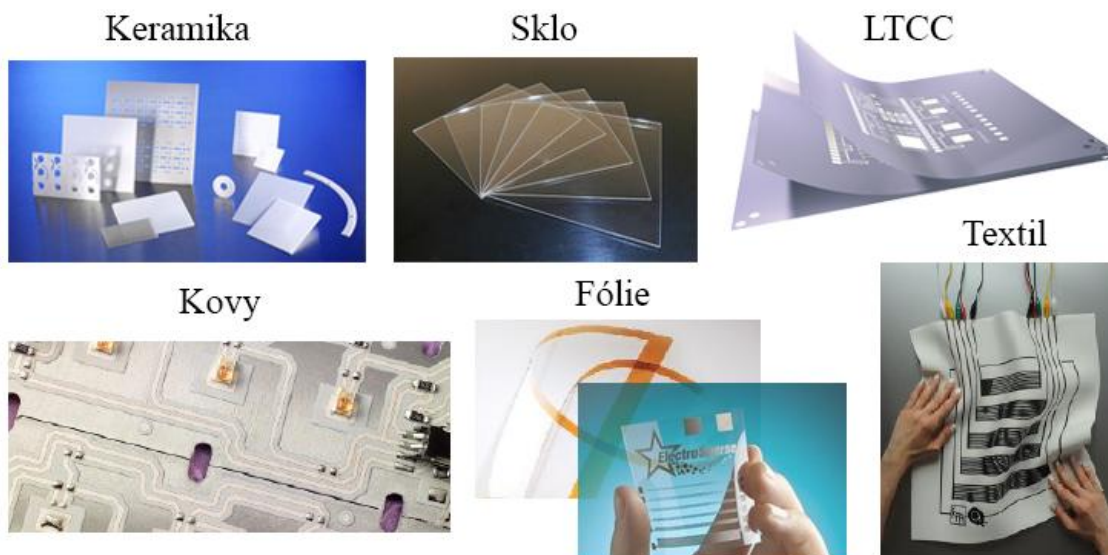
Obr. 3 Závislosť deformácie na mechanickom napätí [10]

1.2.3 Substráty pre hrubovrstvé technológie

Jednotlivé vrstvy sa tlačia na podložku, resp. substrát. K najčastejšie používaným substrátom patria keramické, sklenené alebo polymérne substráty. Pri hrubovrstvej technológii je možné použiť aj rôzne fólie, či textil (viď Obr. 4). Povrchy použitých substrátov musia byť hladké, rovné a čisté. Najviac používaným substrátom je materiál korundová keramika. Materiály substrátov rozdeľujeme do dvoch základných skupín na organické a anorganické. Prehľadné rozdelenie týchto substrátov zobrazuje tabuľka Tab. 4. [13]

Tab. 4 Stručný prehľad materiálov substrátov pri hrubovrstvých technológiách [13]

Organické	FR4 – menej časté, používané pri polymérnych pastách
	Polyméry – polyester (Mylar), polyimid (Kapton)
Anorganické	Keramika – 96% Al_2O_3 (korund), AlN , 99 % BeO , LTCC (low temperature co-fired ceramic) materiály
	Zirkoniové substráty ZrO_2
	Sklo
	Oceľ spolu s izolačnou dielektrickou pastou



Obr. 4 Príklady používaných substrátov [14] [15] [16] [17] [18] [19]

Ďalej rozlišujeme dva základné typy technológie hrubých vrstiev podľa používaného materiálu substrátu. Prvým typom je cermetová hrubovrstvová technológia (cermet thick film), ktorá používa sklo na anorganickej báze, sklo-keramiku a keramiku-sklo-kov, pričom sa vyznačuje pomerne vysokoteplotným vypaľovacím procesom. Druhou možnosťou je polymérna hrubovrstvová technológia (polymer thick film), ktorej základom sú polyméry a polymérne zlúčeniny s nízkou teplotou vytvrdenia. [13]

1.2.4 Nanášanie a tvorba hrubovrstvej štruktúry

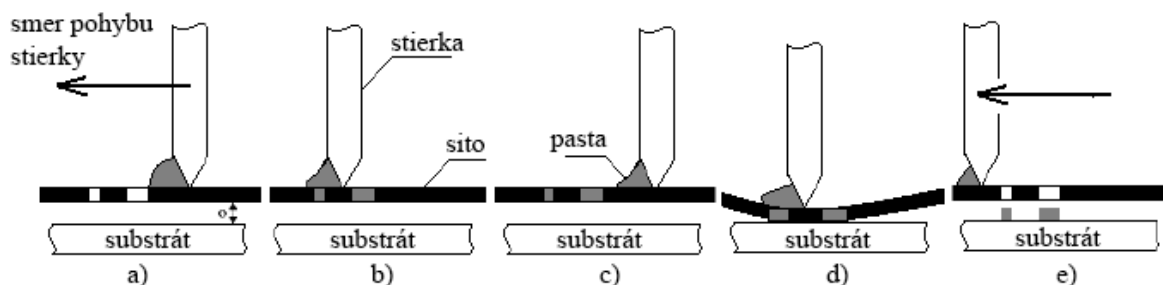
V oblasti mikroelektroniky realizujeme nanášanie hrubých vrstiev nasledovnými tromi spôsobmi:

1) sieťotlač

Túto metódu slúžiacu na nanášanie tixotropných materiálov poznáme už desiatky rokov. Tixotropné materiály sú charakteristické najmä výrazným znížením viskozity pri nanášaní a následným zvýšením viskozity po nanesení. Princíp sieťotlače sa využíva aj pri nanášaní hrubých vrstiev v podobe pást a tiež spájkovacích pást. Jeho hlavnou výhodou je nevákuový, pomerne nenáročný spôsob nanášania, ktorým dokážeme nanieť na nosný substrát cez sieťotlačovú šablónu presne definované množstvo materiálu. Sieťotlač nám zabezpečuje sieťotlačový stroj, ktorý sa skladá z konštrukcie na uchytenie rámu so šablónou, časti na uchytenie substrátu a pohyblivej časti stierky.

Princíp nanášania pasty sieťotlačou pozostáva z niekoľkých krokov, ktoré sú zobrazené na obrázku Obr. 5. Sito je napnuté na ráme, na ktorom je vytvorená šablóna s požadovaným motívom, je situovaný do definovanej polohy vzhľadom k substrátu umiestneného v držiaku. Substrát sa uchyť do držiaku mechanicky alebo pomocou vákua. S týmto krokom je spojený aj mechanizmus uchytenia stierky, čiže stroj musí byť mohutný, aby vedenie stierky bolo spoľahlivé a pevné. Pasta, ktorá sa nanesie na sito, je stierkou následne pretlačená na nosný substrát a na konci prebehne odskok sita od substrátu, čím na substráte zostane realizovaný požadovaný motív.

Dôležité sú materiály sít, ktoré sa zhotovujú tkaním z umelých alebo oceľových vlákien a sú charakteristické pravidelným usporiadaním s definovanými parametrami. Medzi parametre tohto procesu zaraďujeme tlak stierky, rýchlosť stierky a odtrh, ktorý vyjadruje vzdialenosť sita nad substrátom, pričom táto vzdialenosť musí dosahovať hodnotu, ktorá zabezpečí pružný odskok sita od substrátu po prejdení stierky. [20]



Obr. 5 Princíp nanášania pasty sieťotlačou [20]

Dôležitým krokom v procese sieťotlače je hlavne výber sita, ktoré má definované tieto základné parametre:

- a) hustota tkaniny n , ktorá vyjadruje počet ôk na jednotku dĺžky a pri výpočte platí vzťah

$$n = \frac{10}{w + d}, \quad (1.6)$$

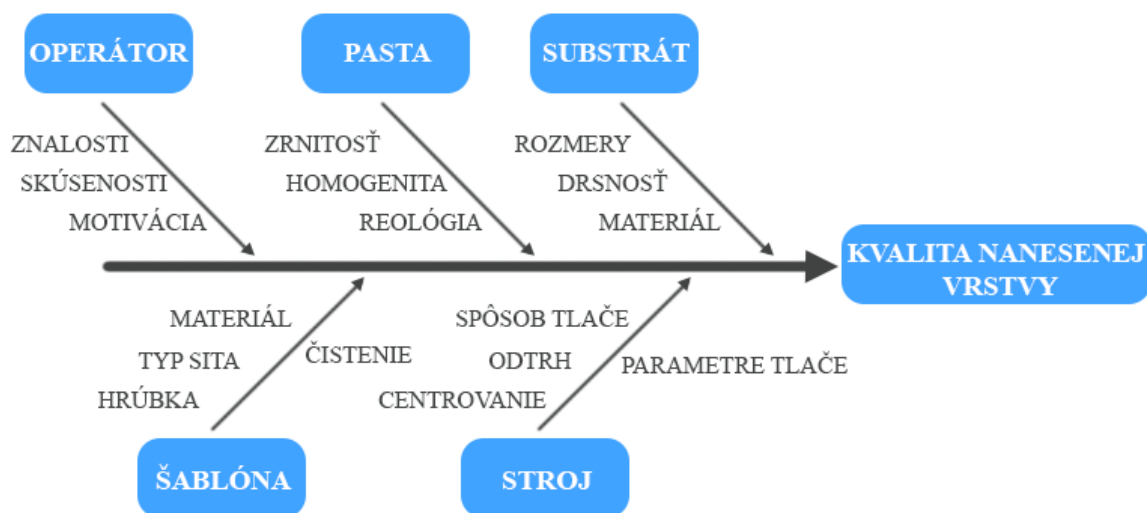
kde w je rozmer strany voľnej plochy oka v mm a d znamená priemer vlákna v mm.

- b) svetlosť sita A_0 vyjadruje otvorenú plochu a možno ju určiť zo vzorca

$$A_0 = \frac{w^2}{(w + d)^2}. \quad (1.7)$$

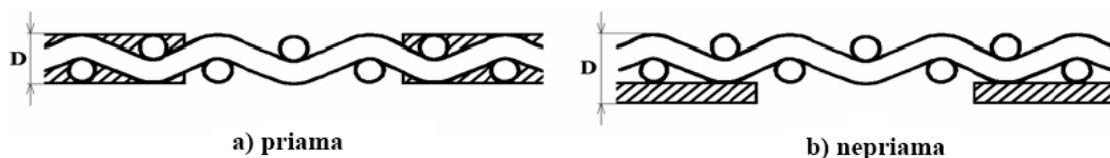
Z uvedených vzťahov vyplýva že počet ôk súvisí aj s priemerom vlákna, ktoré definuje hrúbku tkaniny a to má vplyv aj na výšku nanesej vrstvy. Sita s malým priemerom vlákna sa používajú k tvorbe jemných motívov. Pokiaľ vytvárame motívy s požiadavkami na väčšiu hrúbku vrstvy je potrebné použiť sito s väčším priemerom drôtu, ktorého priemer tiež ovplyvňuje hrúbku tkaniny. [20]

Na nasledujúcom obrázku Obr. 6 môžeme vidieť prehľad všetkých parametrov a vlastností, ktoré majú akýkoľvek vplyv na proces sieťotlače, a teda aj na výslednú hrubovrstvú štruktúru.



Obr. 6 Faktory, ktoré majú vplyv na priebeh sieťotlače [10]

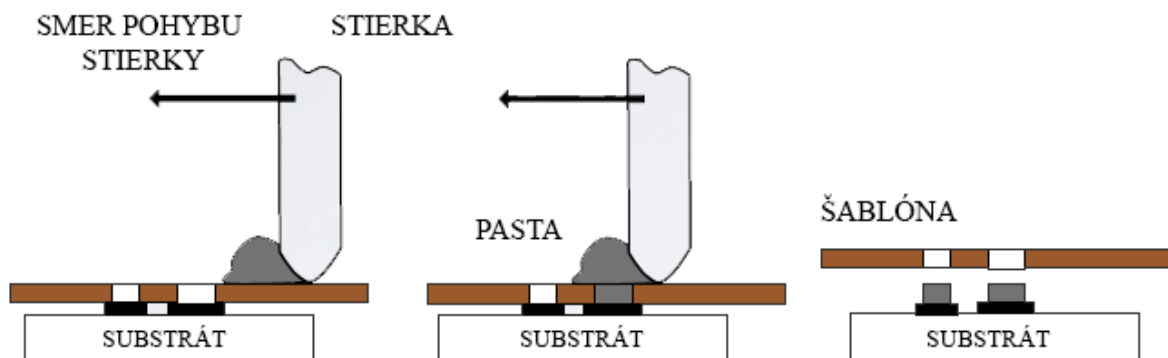
Šablóny používané pri sieťotlačí sú zhotovované na sieťovine buď priamo (priame masky) alebo prostredníctvom plastovej alebo kovovej fólie, čiže nepriamo (nepriame masky). Nanesením fotocitlivej emulzie na sito s následnou expozíciou cez masku s potrebným motívom sa vytvára priama šablóna (viď Obr. 7a). Potom nasleduje osvetlenie, ktorým dôjde k vytvrdeniu emulzie a po oplachu vodou na site zostanú voľné oka iba v priestore, kde sa bude nanášať pasta. Pre porovnanie nepriame šablóny (viď Obr. 7b) majú vopred vytvorený motív na plastovej alebo kovovej fólii. Táto je pred sieťotlačou pevne spojená so sitom. [20]



Obr. 7 Znázornenie rôznych prevedení šablón sieťotlače [20]

2) nanášanie šablónou

Tlač šablónou je svojou podstatou podobný sieťotlačí, no rozdiel tejto metódy je v realizácii šablóny. Šablóna je realizovaná tak, že motív k tlači je vytvorený na pevnom materiáli (oceľová alebo bronzová planžeta). V prípade šablónovej tlače je do rámu pripevnená kovová šablóna s vytvoreným motívom namiesto sita. Hovoríme o kontaktnom spôsobe tlači, čiže na použitý substrát, resp. plôšky po celý čas tlače priamo dolieha šablóna. Z toho vyplýva, že hodnota odtrhu sa rovná po celú dobu tlače nule. K následnému odtrhu šablóny od substrátu dôjde mechanickým pohybom, zväčša stolu stroja. Odtrh šablóny nastane až po nanesení pasty a teda po ukončení pohybu stierky. Pasta odpovedajúceho tvaru príslušného nanášaného motívu je po odtrhu prenesená na substrát. Dôležité je, že tlačéné motívy musia byť natoľko uzavreté plochy, aby sa nenarušila tuhosť šablóny. Aby sa šablóna dobre oddelila od nanesenej pasty, musí byť dostatočná rýchlosť odtrhu. Toto má vplyv aj na to, aby nanesený obrazec zostal zachovaný. Na nasledujúcom obrázku (viď Obr. 8) sú znázornené základné kroky použité pri šablónovej tlači. [21]



Obr. 8 Princíp šablónovej tlače [10]

Tento spôsob možno použiť pri nanášaní súvislých plôch, no nie príliš zložitých čiar. Z toho dôvodu sa používa najmä pri nanášaní spájkovacích pást a pri tvorbe kontaktných plôch. [10]

Pri šablónovej tlači používame rôzne typy šablón. Jednou z nich sú chemicky leptané šablóny, ktoré sa vyrábajú chemickým odleptaním plechu. Príkladom sú šablóny z nerezovej ocele, kedy sa na plech nanáša obraz z chemicky odolnej látky, ktorá slúži ako ochrana miest, ktoré nemajú byť odleptané. Pri tejto metóde sa však vytvárajú šikmé hrany, ktoré tak môžu zapríčiniť zatekanie pasty pri veľmi jemných štruktúrach. Ďalším typom sú laserovo rezané šablóny, ktoré sú vytvorené za pomoci laserového lúča rezaním do kovovej dosky. Tieto šablóny sú oveľa drahšie ako chemicky leptané, pomocou nich je možno dosiahnuť hladký povrch, pričom táto metóda výhodná pre veľmi presné aplikácie a pri depozícii waferov. Šablóny, ktoré sú vytvorené nanášaním niklu na fotoaktívnu plastovú vrstvu pokovovaním, kedy sa táto vrstva pôsobením svetla mení na požadovaný obraz šablóny sa nazývajú galvanoplastické šablóny. Tieto šablóny sú najlepšie pre veľmi jemné štruktúry a wafer, navyše sú päť až desaťkrát lacnejšie ako šablóny vytvorené laserovým rezaním s rovnakým množstvom otvorov. [11]

Pred výrobou a použitím šablóny je potrebný návrh šablóny, pri ktorom je dôležitá hrúbka šablóny t zvolená podľa rozmerov motívu a kritickým je minimálny rozmer x_{min} vodiča. Pri návrhu šablón všeobecne platí pravidlo, že najmenší rozmer pravouhlého motívu musí byť väčší ako 0,66 hrúbky šablóny, čo je možné vyjadriť pomerom

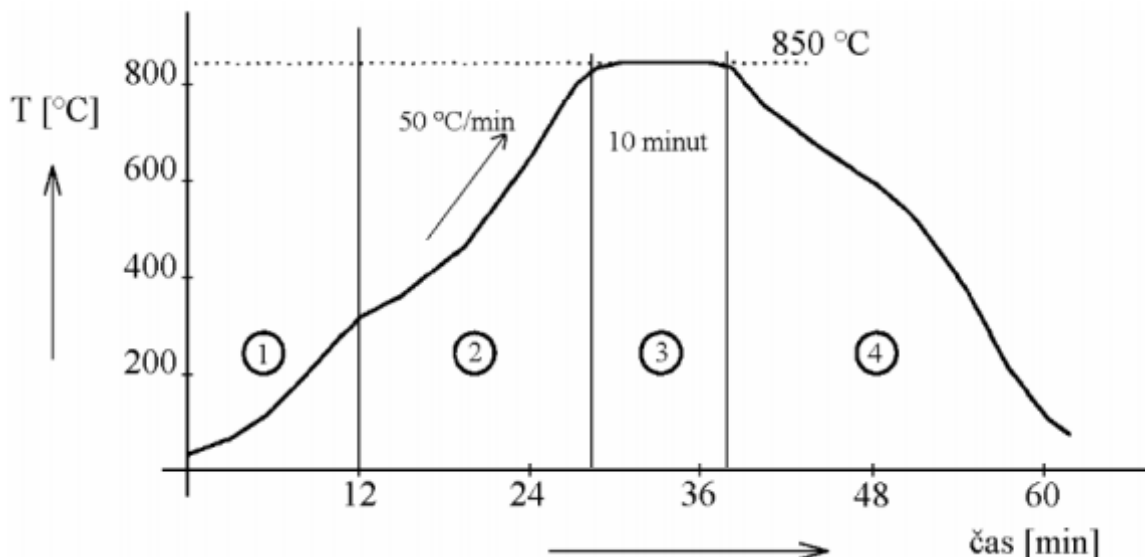
$$x_{min} : t = 1 : 1,5 .$$

3) popisom (dispenzia)

Túto metódu nazývanú anglicky *direct writting* možno pri nanášaní hrubých vrstiev považovať za relatívne nový spôsob, pri ktorom sa tixotropné materiály nanášajú na podložku, resp. substrát. Zariadenie sa skladá zo základných častí ako sú súradnicový zapisovač (plotter) s dávkovacou jednotkou (dispenzer), posun stolčeka (manipulátor) a riadiaca jednotka so softvérom. Nanášanie je realizované pomocou programom riadeného dávkovača, ktorého koniec má hrot s dutinou, z ktorej vychádza pasta na niekoľko desiatok mikrometrov vzdialený substrát. [20]

1.2.5 Výpal, sintrácia hrubých vrstiev

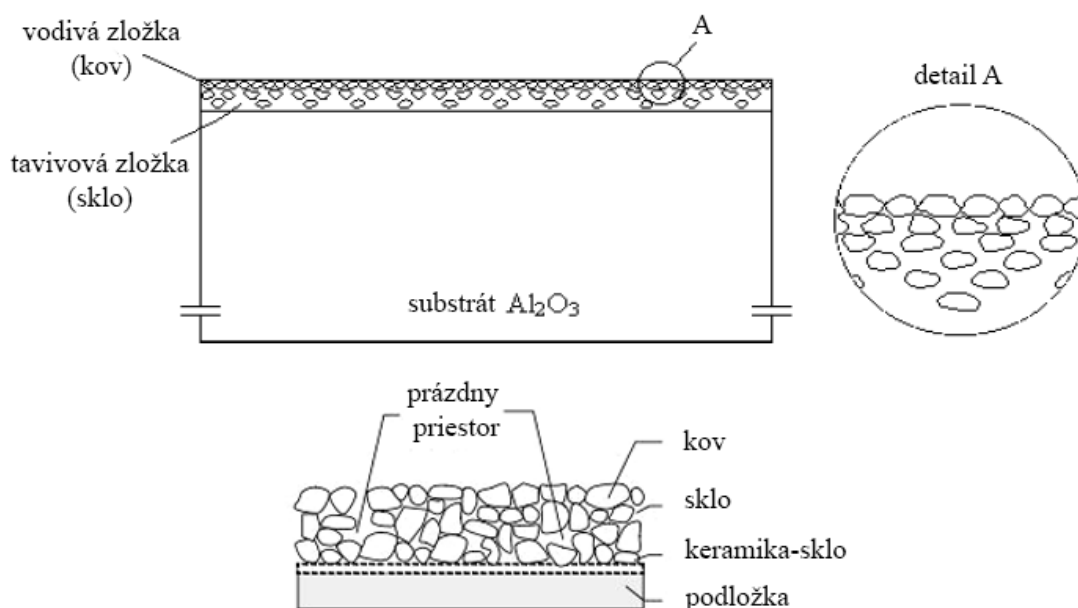
Po nanosení hrubovrstvej pasty na zvolený substrát je potrebné túto vrstvu tepelne spracovať, čo nazývame výpal alebo sintrácia. V priebehu tohto procesu dochádza k spojeniu nanesej vrstvy so substrátom, pričom sa formuje na povrchu aktívna štruktúra. Tento proces sa realizuje v priebežnej peci s príslušným definovaným teplotným profilom. Na obrázku Obr. 9 sú znázornené jednotlivé zóny vypaľovania hrubých vrstiev. [20]



Obr. 9 Priebeh výpalu hrubých vrstiev, teplotný profil [20]

Potom ako je na substráte nanosený hrubovrstvý materiál, v prvej časti profilu nasleduje vyrovnanie nanesej vrstvy pri izbovej teplote (aspoň 15 minút) a jej zasušenie pri teplote asi 150 °C po dobu 10 minút. Jedná sa o fázu sušenia, pri ktorej dochádza k odpareniu organických riedidiel a hrúbka vrstvy by po tejto fáze mala byť všeobecne desiatky mikrometrov. V ďalšej časti je teplota okolo 350 °C, pri ktorej sa odparujú zvyšky organických rozpúšťadiel. Ide o zónu predohrevu, kedy vyhorieva filmotvorný materiál. Potom sa teplota pozvoľne zvyšuje na 850 °C, kedy dochádza k samotnému výpalu. V zóne vypaľovania prebiehajú dôležité chemické reakcie, ktoré ovplyvňujú finálne vlastnosti pasty. Poslednou je zóna chladenia, v ktorej sa teplota postupne znižuje až na teplotu okolia a dochádza k tuhnutiu roztavenej sklenenej fáze. [22]

Teplotný profil priebežnej pece (viď Obr. 9) je regulovaný v niekoľko zónach, ktoré sú popísané vyššie, s vysokou presnosťou (± 2 °C) z dôvodu, aby bol proces reprodukovateľný. Ďalším dôležitým faktorom je postupné zvyšovanie, rovnako ako aj postupné znižovanie teploty pri chladení (≤ 50 °C/min). Výsledná vypálená vrstva je odolná pred mechanickými aj chemickými vplyvmi a zároveň tvrdá. [20]



Obr. 10 Detailný pohľad na hrubú vrstvu na substráte po výpale [20] [23]

Teplota pásma výpalu zodpovedá teplote, pri ktorej síce mäknú, resp. tavia sa tavivové časti pasty, no funkčná zložka zostáva v tuhej fáze, čiže je bez výrazných zmien. Pasta sa po výpale transformuje na funkčnú vrstvu, ktorá má náležité elektrické vlastnosti. V tavivovej zložke je usadená funkčná (vodivá) zložka tak, že vytvára neprerušovanú vrstvu na povrchu. Z toho dôvodu je tzv. maticou pre funkčnú zložku tavivová zložka, ktorá zároveň zaisťuje aj väzbu na substrát (viď Obr. 10). [20]

1.3 Topné elementy

V nasledujúcej podkapitole budú popísané bežne používané topné dosky v priemysle a ich vlastnosti a typy materiálov typické pre hot plate.

1.3.1 Používané topné dosky

Topné dosky, resp. anglicky hot plates sa rozšírene používajú v množstve priemyslových aplikácií. Rozmery týchto topných dosiek sa pohybujú v rozsahu od 2 až do 300 cm². Typické teploty, pri ktorých pracujú sú definované v rozsahu od 100 do 750 °C, pričom väčšina priemyselných topných dosiek vydrží zaťaženie viac ako 70 kg.

Priemyselné hot plates, ktoré sú tvorené poréznu vyhrievanou doskou sa používajú k rovnomernému zahrievaniu tenkých vrstiev tak, že sa vrstvy pevne natiahnu na dosku pomocou vákua. Pri výrobe polovodičov sa rozšírene používajú práve tieto topné dosky (viď Obr. 11a). Hot plates využívajúce špeciálne materiály a ochranné povlaky sa používajú najmä v ťažobnom priemysle a priemyselných odvetviach, kde je realizovaný ohrev vzoriek toxických chemikálií. Takéto hot plates sa označujú aj ako hot plates odolné voči korózii. Hot plates sa široko používajú aj v elektronickom priemysle ako metóda spájkovania a oddeľovania súčiastok a komponentov dosiek plošných spojov (viď Obr. 11b). Topné dosky, ktoré

obsahujú dve topné plochy sú používané k taveniu a spájaniu plastových trubiek. Väčšina z týchto trubiek má priemer nad 90 centimetrov. Dve trubky, ktoré majú byť spojené, sú pritlačené k doske až pokým nie sú okraje mäkké. Potom sa doska odstráni, obidve trubky sa stlačia a dôjde k ich spojeniu. [24]



Obr. 11 Hot plates používané pri výrobe polovodičov a na spájkovanie [25] [26]

1.3.2 Typy topných elementov

Hot plates popísané v predchádzajúcej kapitole sú tvorené rôznymi topnými elementmi, prípadne obsahujú aj viac topných plôch, ktoré môžu byť vyrobené z rôznych druhov materiálov. Topné elementy môžu byť realizované kovmi, keramikou a polovodičmi, hrubovrstvou technológiou alebo polymérom.

Kovy

Základom týchto topných telies je odporový drôt. Kovové odporové vyhrievacie prvky môžu byť drôty alebo pásy, buď priame alebo zvinuté. Bežne sa používajú v zariadeniach, ktoré každodenne používame, ako sú hriankovače, sušiče vlasov, podlahové kúrenie, strešné vykurovanie, priemyselné pece, vykurovanie chodníkov na topenie snehu atď. Najbežnejšie používané materiály pri výrobe kovových topných telies sú:

- Nichróm – Väčšina odporových ohrievacích prvkov v tvare drôtu používajú nichróm 80/20 (80 % nikel, 20 % chróm), ktorý je ideálnym materiálom, pretože má relatívne vysokú odolnosť a pri prvom zahriatí vytvorí priľnavú vrstvu oxidu chrómu. To znamená, že materiál pod touto vrstvou nebude oxidovať, čím zabráni drôtu aby sa zlomil či zhorel.
- Vodiče Kanthal-u (FeCrAl)
- Zliatina Cupronickel (CuNi) určená na zahrievanie pri nízkej teplote
- Leptaná fólia – Leptané fóliové prvky sa zvyčajne vyrábajú z rovnakých zliatin ako prvky odporového drôtu, no sú vyrobené subtraktívnym procesom leptania, ktorý začína súvislou vrstvou kovovej fólie a výsledkom je zložitý odporový

obrazec. Tieto prvky sa vyskytujú predovšetkým v presných vykurovacích aplikáciách ako sú lekárska diagnostika a letectvo. [27]

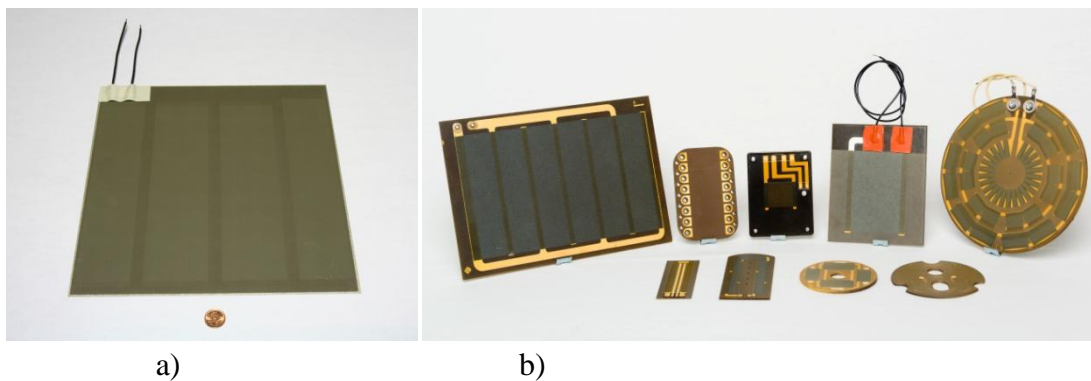
Keramika a polovodiče

- Molybdén disilicíd (MoSi_2) je intermetalická zlúčenina, kde silicíd molybdénu je žiaruvzdorná keramika, ktorú možno použiť najmä vo vykurovacích telesách. Má priemernú hustotu, bod topenia $2030\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je elektricky vodivá. Pri vysokých teplotách sa vytvára pasívna vrstva oxidu kremičitého, ktorá tvorí ochranu pred ďalšou oxidáciou. Do oblasti použitia možno zahrnúť sklársky priemysel, keramické vypekanie, pece na tepelné spracovanie a polovodičové difúzne pece.
- Karbid kremíka (SiC) – Ponúka zvýšené prevádzkové teploty v porovnaní s kovovými ohrievacími elementmi. Nachádza široké uplatnenie pri tavení skla a farebných kovov, pri tepelnom spracovaní kovov, výrobe keramických a elektronických komponentov, v oblasti plynových ohrievačov atď. [28]
- PTC keramické elementy – PTC keramický materiál je pomenovaný podľa svojho pozitívneho teplotného koeficientu odporu (odpor sa zahrievaním zvyšuje). Tieto materiály (často kompozity titaničitanu bárnateho a titaničitanu olova) majú vysoko nelineárnu teplotnú reakciu, čiže nad prahovou teplotou sa ich odpor rýchlo zvyšuje (väčšina keramiky má záporný teplotný koeficient odporu). Tenké vrstvy týchto materiálov sa používajú v automobiloch pri odmrazovačoch zadných okien, v drahších sušičoch na vlasy a ohrievačoch priestoru. [27]

Topné prvky realizované hrubovrstvou technológiou

Tieto vyhrievacie prvky sú realizované na tenkej podložke (substrát) pomocou hrubovrstvej technológie. Sú typom odporového topného telesa, no v porovnaní s konvenčným odporovým prvkom s kovovým plášťom majú rôzne výhody. Hrubovrstvé topné prvky sa vyznačujú zlepšenou rovnomernosťou teploty, rýchlou tepelnou odozvou v dôsledku nízkej tepelnej hmotnosti, nízkou spotrebou energie, vysokou výkonovou hustotou a širokým rozsahom napätia. Tento typ topných elementov sa zvyčajne tlačí na ploché substráty. V závislosti od prenosu tepla môžu dosiahnuť výkonovú hustotu až 100 W/cm^2 . Obrazce, resp. vzory hrubovrstvých telies sú prispôsobiteľné na základe vrstvomého odporu danej tlačenej odporovej pasty.

Substrátmi, na ktoré sú tlačené tieto prvky hrubovrstvou technológiou môžu byť kovy (viď Obr. 12b), keramika, sklo, textil a polyméry s použitím pást hrubých vrstiev s obsahom kovu, prípadne zliatiny. Medzi najpoužívanejšie substráty na tlač týchto topných telies patria hliník, nehrdzavejúca oceľ a lístky sľudy z muskovitu alebo flogopitu (viď Obr. 12a). [27]



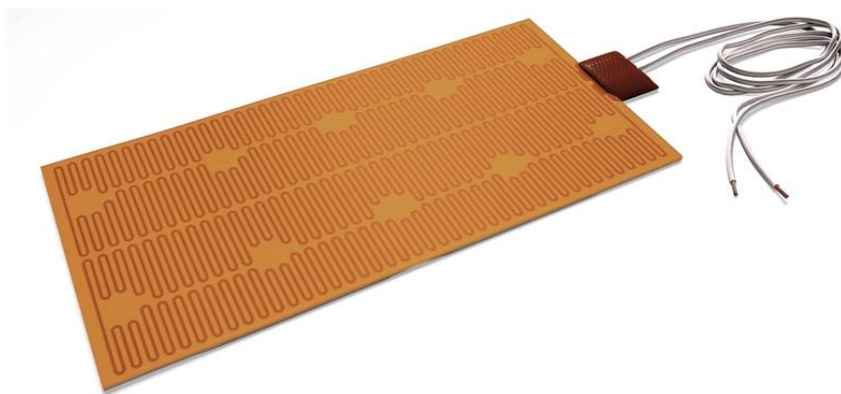
Obr. 12 Topný prvok hrubej vrstvy tlačenej na liste sľudy a kovovom substráte [29] [30]

Použitie hrubovrstvých topných elementov sa veľmi líši v závislosti od zvoleného materiálu substrátu. Môžu sa používať žehličkách, elektrickom vykurovaní, zvlhčovačoch vzduchu, čajových kanviciach, ohrievačoch vody, bojleroch, v 3D tlačiarňach, laboratórne ohrievacie zariadenia, bočné spätné zrkadlá, výmenníky tepla atď. Vo väčšine aplikácií sú kľúčovými parametrami tepelné vlastnosti a rozloženie teploty. Aby sa zabránilo horúcim miestam, a aby sa udržiavalo rovnomerné rozloženie teploty na substráte, je potrebné optimalizovať návrh obvodu. Optimalizovaný obvod topného elementu pomáha regulovať jeho výkon a umožňuje zmenu lokálnych teplôt na substráte.

Hrubovrstvé topné elementy môžeme rozdeliť do dvoch podkategórií. NTC (negatívny teplotný koeficient) sa vyznačujú znížením odporu pri zvyšovaní teploty, čiže majú vyšší výkon pri vyšších teplotách pri danom vstupnom napätí. PTC (pozitívny teplotný koeficient) pracujú tak, že zvyšujú odpor pri zvýšení teploty. Vďaka tejto charakteristike sú tiež samoregulačné, pretože ich výstupný výkon sa saturuje pri stálej teplote, zatiaľ čo NTC vyžadujú na reguláciu ohrievača termostat alebo termočlánok. Tento typ sa používa tam, kde sa vyžaduje rýchle zvyšovanie teploty na vopred stanovenú hodnotu, pretože sú obvykle rýchlejšie ako typ PTC. [27]

Polymér PTC

Takýto typ topných telies je vyrábaný z PTC vodivých gumových materiálov, kde sa odpor exponenciálne zvyšuje so zvyšujúcou sa teplotou. Bude tak poskytovať vysoký výkon, keď je chladný a rýchlo sa zohreje na konštantnú teplotu. Z dôvodu exponenciálne zvyšujúceho sa odporu sa takýto topný element nikdy nemôže zohriať na vyššiu teplotu ako je táto. Pri tejto teplote guma pôsobí ako elektrický izolátor. Teplotu je možné voľiť počas výroby gummy. Typické teploty sú od 0 °C do 80 °C. Jedná sa o riadený samoregulačný ohrievač, čo znamená, že si nezávisle udržiava konštantnú teplotu bez potreby elektroniky regulácie, pričom nikdy nemôže prekročiť určitú teplotu, čiže nie je potrebná ochrana pred prehriatím. Príklad takéhoto topného telesa je zobrazený na obrázku Obr. 13. [27]

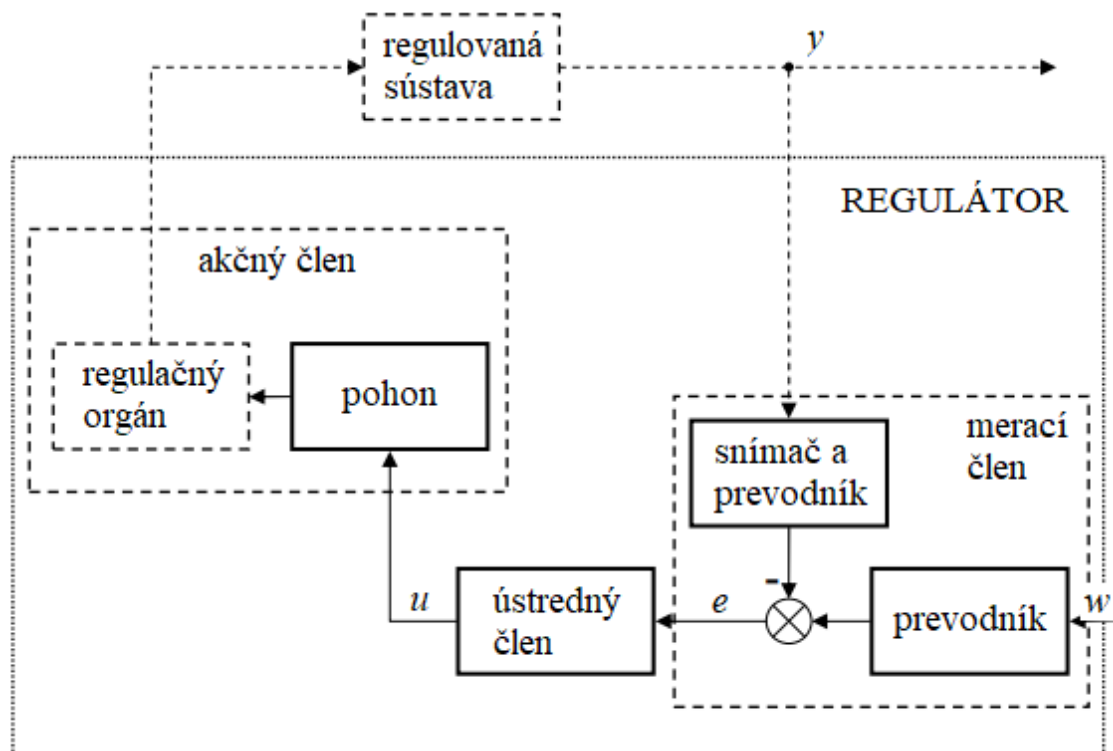


Obr. 13 Flexibilný PTC topný prvok z vodivej gumy [31]

1.4 Regulátory

Hlavnou úlohou, ktorú regulátor plní, je pomocou akčnej veličiny pôsobiť na regulovanú sústavu, tak aby sa regulovaná veličina udržiavala na nastavenej hodnote a hodnota regulačnej odchýlky bola nulová, resp. čo najmenšia. Zapojenie obvodu regulátora je realizované so spätnou väzbou, v dôsledku čoho regulátor znižuje regulačnú odchýlku. V prípade, že regulačná odchýlka je nulová a na výstupe regulátora je nula, regulátor nie je v činnosti.

Systém regulátora je zložený z niekoľkých prvkov znázornených na obrázku Obr. 14. Ide o merací člen, ústredný člen a akčný člen. [32]



Obr. 14 Schéma regulátora [32]

Merací člen sa skladá zo snímača s prevodníkom, z prevodníka riadiacej veličiny a z porovnávajúceho člena. Snímač alebo senzor zisťuje časový priebeh regulovanej veličiny, pričom jeho voľba závisí od druhu regulovanej fyzikálnej veličiny a tiež od umiestnenia v regulovanej sústave. Presnosť senzoru je zvolená vzhľadom k presnosti regulácie. Spomínaný senzor obsahuje prevodník, ktorý transformuje regulovanú veličinu na elektrické napätie, prípadne prúd. Následne je získaný výstupný signál porovnávajúcim členom odpočítaný od požadovanej hodnoty regulovanej veličiny, pričom rozdielom je regulačná odchýlka.

Ústredný člen ďalej spracováva regulačnú odchýlku, ktorú môže zosilňovať, integrovať a derivovať. Tento člen má výrazný vplyv na priebeh regulácie a jeho parametre môžeme meniť resp. voliť. Keď hovoríme o návrhu vhodných parametrov regulátora, ide predovšetkým o ústredný člen.

Akčný člen pozostáva z pohonu a regulačného orgánu. Zdrojom energie pre regulačný orgán je práve pohon. Regulačný orgán mení hodnotu akčnej veličiny a väčšinou je priradený k regulovanej sústave. Príkladom môžu byť rôzne ventily, klapky atď.

Tak ako bolo uvedené vyššie, regulátor, resp. ústredný člen môže regulačnú odchýlku zosilňovať, integrovať a derivovať. Možno povedať, že regulátor je zložený z troch menších regulátorov, pričom jednotlivé zložky môžeme kombinovať. [32]

Proporcionálny regulátor

Proporcionálny regulátor je zo všetkých troch najjednoduchší a funguje ako zosilňovač. Výstup, resp. akčná veličina tohto regulátora je priamo úmerná vstupu, čiže regulačnej odchýlke. Ustálenie prechodovej charakteristiky v krátkom čase je základným znakom proporcionálnych regulátorov.

Integračný regulátor

Ide o typ regulátoru, ktorý nepracuje len s aktuálnou hodnotou, ale aj s predchádzajúcimi hodnotami regulačnej odchýlky (s ich integrálom) s cieľom minimalizovať ich. Úplné odstránenie regulačnej odchýlky nastane až za určitý čas. Kvôli tomu je schopný včas upraviť riadenie systému, aby približovanie k ideálu bolo plynulejšie a odchýlka toľko nekmitala okolo nuly. Integračný regulátor používame v prípade, že regulovaná sústava má veľkú zotrvačnosť alebo tam, kde nie sú príliš časté poruchy. Tento typ regulátoru má veľkú odolnosť proti krátkodobým poruchám. [33]

Derivačný regulátor

Derivačný regulátor sa nedá realizovať ako ideálny. Príčinou je parazitná zotrvačnosť, ktorá pri vysokých frekvenciách potlačuje jeho prenos (v oblasti vysokých frekvencií by mal byť prenos naopak čo najväčší). Pri konštantnom vstupe má derivačný regulátor hodnotu prenosu rovnú nule. Keďže derivačný regulátor sám nedokáže zosilňovať regulačnú odchýlku, je potrebné ho kombinovať s proporcionálnym alebo integračným regulátorom. V prípade týchto kombinácií dokáže zrýchliť reguláciu a zvýšiť stabilitu. Vplyv tohto typu regulátora je najviac viditeľný v prípade, kedy sa stav regulovanej sústavy blíži k optimálnej hodnote, čím dokáže ešte viac potlačiť kmitanie odchýlky okolo nuly.

Proporcionálne integračný regulátor

Pozostáva z paralelného spojenia proporcionálneho a integračného regulátora. V dôsledku tohto spojenie dokážeme meniť parametre zosilnenia a integračnú časovú konštantu. Medzi kombinovanými regulátormi je PI regulátor najrozšírenejší. Výhodou je, že má univerzálne použitie. Ďalej dokáže úplne odstrániť regulačnú odchýlku, je schopný odstraňovať poruchy vstupujúce do regulovanej sústavy a tiež zlepšuje stabilitu celého systému. Najväčšie využitie nachádza pri regulácii kmitavých sústav druhého a aj vyššieho rádu.

Proporcionálne derivačný regulátor

Tento typ regulátora sa skladá z paralelného spojenia proporcionálneho a derivačného regulátora. PD regulátor je možné použiť všade tam, kde sú vhodné vlastnosti proporcionálneho regulátora. Najväčšou výhodou je najmä vyššia rýchlosť regulácie, ktorá má vplyv pri potlačovaní rýchleho kmitania regulovanej veličiny. V prípade, že do regulovanej sústavy často vstupujú poruchy je vhodné použiť PD regulátor. Voľbou vhodnej časovej konštanty je možné znížiť rád regulovanej sústavy, čím sa zvýši stabilita regulovanej sústavy. [32]

Proporcionálne integračný derivačný regulátor

PID regulátor je tvorený paralelným spojením proporcionálneho, integračného a derivačného regulátora. Je možné ho použiť tam, kde je vhodný aj PI regulátor. PID regulátor je na rozdiel od PI regulátora rýchlejší, čiže môže lepšie tlmiť rýchle prekmity regulovanej veličiny. [32]

Rovnice popisujúce jednotlivé typy regulátorov a ich prenosy sú zobrazené v prehľadnej tabuľke Tab. 5.

Tab. 5 Dynamické vlastnosti rôznych typov regulátorov [32]

Typ regulátora	Rovnica	Prenos $G_R(s)$	
P	$u(t) = r_0 e(t)$	r_0	r_0
I	$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt$	$\frac{r_{-1}}{s}$	$\frac{r_0}{T_i s}$
D	$u(t) = r_1 e'(t)$	$r_1 s$	$r_0 T_d s$
PI	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$
PD	$u(t) = r_0 e(t) + r_1 e'(t)$	$r_0 + r_1 s$	$r_0 (1 + T_d s)$
PID	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 e'(t)$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$

2 NÁVRH ČASTÍ ZARIADENIA

Táto kapitola sa zaoberá návrhom výsledného topného telesa. Prvá časť rozoberá návrh výsledného motívu, ktorý bude aplikovaný, resp. natlačený na keramický substrát a bude plniť úlohu topného elementu. Bolo potrebné zistiť a zvoliť počet štvorcov navrhovaného motívu a následne vypočítať odpor motívu z odporovej pasty. Rovnaký postup nasledoval aj pri vodivých plochách, na ktoré bude pripojené napájanie topného elementu, no na rozdiel od motívu tu bude použitá vodivá pasta. Posledná podkapitola obsahuje návrh optimalizovaného motívu, kde bola použitá na celý motív iba vodivá pasta, pričom postup návrhu bol rovnaký ako v prípade testovacích motívov.

V ďalšej časti boli vytvorené modely navrhnutých motívov, ktoré možno nazvať aj ako digitálne dvojčatá reálnych natlačených substrátov s príslušným motívom. Tieto modely boli vytvorené v programe SOLIDWORKS 2016 pre následnú simuláciu v simulačnom programe ANSYS Workbench 17.1, resp. ANSYS Workbench 2020 R1. V tejto časti sú následne porovnané teplotné simulácie jednotlivých motívov.

Potom bolo potrebné navrhnuť výslednú konštrukciu hot plate. Táto konštrukcia bola vytvorená v programe SOLIDWORKS 2016, ktorej jednotlivé časti a zostavenie boli popísané v danej časti návrhu. Prehľadné obrázky zobrazujúce výslednú konštrukciu a jej rozloženie boli spracované v jednej zo súčastí tejto verzie programu SOLIDWORKS 2016.

V poslednom kroku návrhu bol zvolený typ regulácie, ktorá bude regulovať teplotu na povrchu hot plate, pričom bude navrhovaná aj elektronika a vzájomné spojenie topných elementov (dva keramické substráty) a elektronického riadenia teploty. V tejto časti je ďalej popísaný návrh jednotlivých častí hardvéru výsledného elektronického systému. Nakoniec je tu rozbor zvolených a dostupných materiálov pre konštrukciu zariadenia a jednotlivých súčastí.

2.1 Návrh motívu a použitý substrát

V tejto časti bolo nutné vybrať materiál substrátu, na ktorý bude prenesený požadovaný odporový a vodivý motív. Výber pozostával z voľby buď kovového alebo keramického substrátu. Z dôvodu použitia odporových a vodivých pást a využívania technológie hrubých vrstiev bolo stanovené rozhodnutie použiť keramický substrát z korundovej keramiky Al_2O_3 , ktorej ďalšie výhody spočívajú aj vo vysokej pracovnej teplote, zároveň jedným z dôvodov výberu keramického substrátu boli aj predchádzajúce skúsenosti nadobudnuté pri technologickom predmete na bakalárskom stupni štúdia.

Pri návrhu nasledujúcich motívov je nutné počítať s dvomi keramickými substrátmi zapojenými sériovo z dôvodu požadovaných rozmerov topného elementu, ktoré nadobúdajú rozmery 210 x 105 mm. Tieto rozmery boli stanovené v rámci konzultácie s kolegami, ktorý využívajú podobný typ zariadenia.

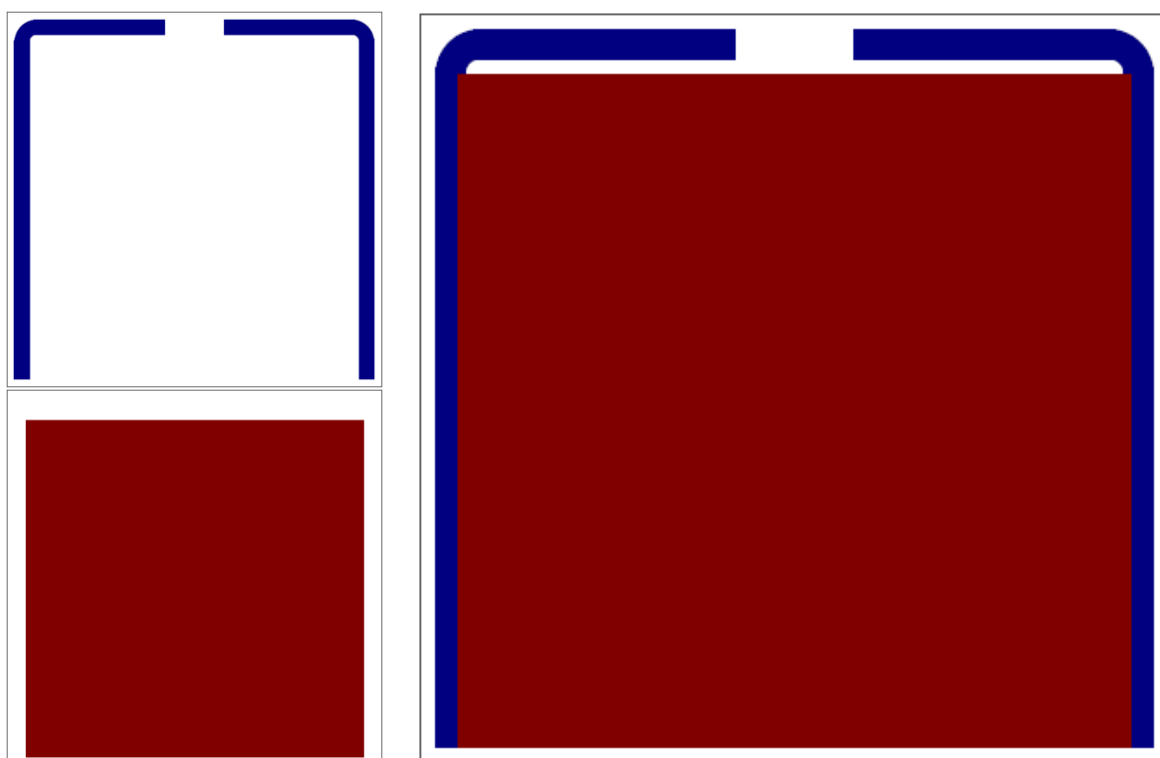
Ďalším krokom v procese návrhu je samotný návrh motívu, ktorý bol podľa zhotovenej filmovej predlohy vyrobený a potom natlačený pomocou sieťotlače na zvolený keramický substrát z korundovej keramiky Al_2O_3 . Pri návrhu prvého motívu bol postup vychádzajúci z nasledujúceho vzťahu:

$$R_1 = R_{\square} \cdot \frac{l}{w} = 100 \cdot \frac{90 \cdot 10^{-3}}{90 \cdot 10^{-3}} = 100 \, \Omega . \quad (2.1)$$

Na ďalšom obrázku Obr. 15 je znázornený prvý navrhnutý motív, pri ktorom bol kladený dôraz na jednoduchosť pri výrobe prvého testovaného substrátu. V tomto prípade možno nazvať prvý navrhnutý motív aj ako testovací. Na tomto obrázku možno vidieť rozdelený vodivý a odporový motív aj výsledný návrh motívu.

Pri návrhu bol zvolený typ použitej odporovej pasty ESL 2712 s definovaným vrstvom odporom $R_{\square} = 100 \, \Omega/\square$, kedy pri rozmeroch navrhnutého odporového motívu $90 \times 90 \, \text{mm}$ ide o jeden štvorec a motív má odpor $100 \, \Omega$, čiže výsledný odpor dvoch sériovo zapojených substrátov by bol $R_{MI} = 200 \, \Omega$.

Pri vodivých plôškach bude použitá vodivá pasta, pričom motív a rozmery vodivých plôch sú navrhované s ohľadom na jednoduchosť pripojenia k elektronike a k druhému keramickému substrátu (vzdialenosť vodivých plôch). Pri realizácii vodivých plôch bude použitá vodivá pasta ESL 9912-K, ktorej zloženie je na základe striebra. Pri výpočte je uvažovaná medzná hodnota rezistivity použitej vodivej pasty $2,5 \, \text{m}\Omega/\square$. Dosadením tejto hodnoty rezistivity do vzťahu (2.1) bola zistená hodnota odporu vodivej plochy navrhovaného motívu. Keďže tieto plochy majú tvar obdĺžnikov s jedným rohom je potrebné spočítať počet štvorcov pri zvolenom rozmere jedného štvorca $4 \times 4 \, \text{mm}$. Pri spočítanom počte štvorcov $A = 32,56$ je výsledný odpor vodivých plôch rovný $81,4 \, \text{m}\Omega$.



Obr. 15 Zobrazenie prvého (testovacieho) navrhnutého motívu

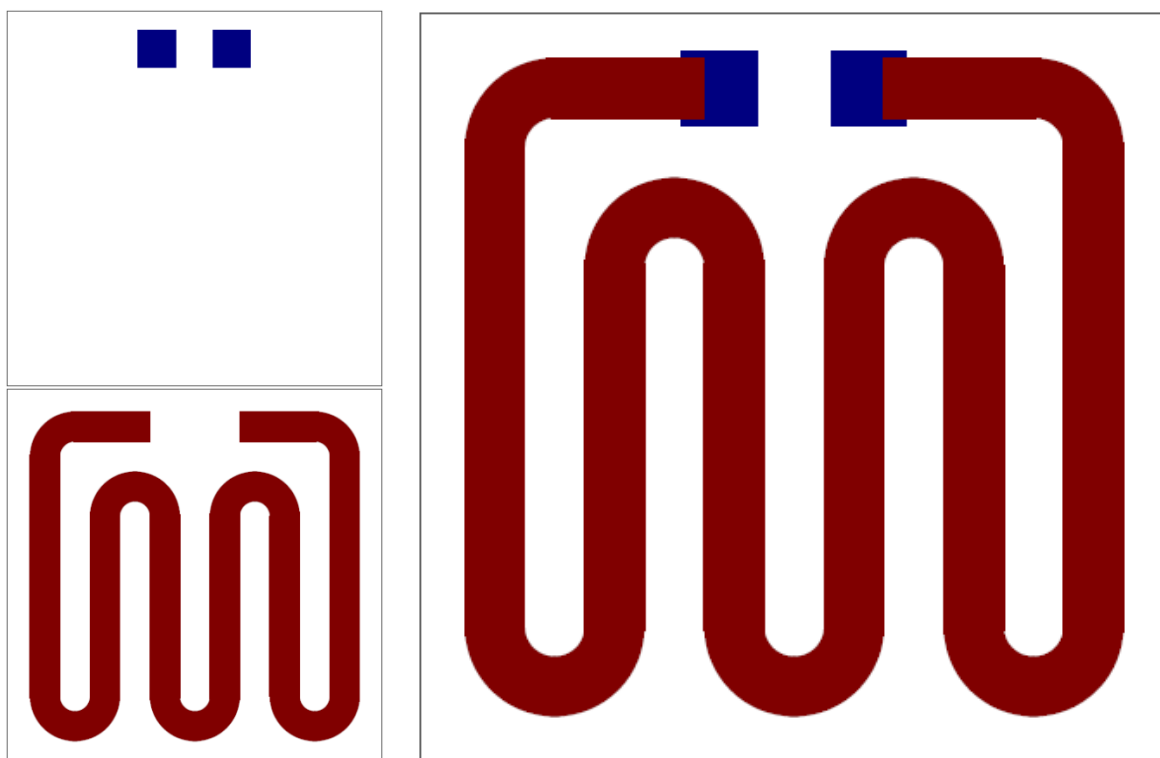
Návrh druhého motívu vychádzal z odporového motívu meandrového typu (viď Obr. 16), kedy bol zvolený rozmer jedného štvorca a následným spočítaním všetkých štvorcov bol zistený výsledný počet štvorcov. Dôležitým poznatkom je fakt,

že zistený počet štvorcov v rohoch navrhnutého motívu bol násobený číslom 0,56 z dôvodu polovičnej prúdovej hustoty. [34] Voľba návrhu odporového motívu tohto meandrového typu bola najmä kvôli úspore materiálu vzhľadom k návrhu prvého testovacieho motívu. Rozmer jedného štvorca vzhľadom k rozmeru substrátu, resp. ostatným vzdialenostiam na použitom substráte a dosiahnutia príslušného odporu motívu bol zvolený 8 x 8 mm. Počet štvorcov daného motívu bude rovný hodnote 63,72. Pri realizácii tohto motívu bola použitá odporová pasta typu ESL 3910 s definovaným vrstvom odporom $R_{\square} = 1 \text{ } \Omega/\square$. Keď boli tieto určené a definované parametre dosadené do nasledujúceho vzorca:

$$R_2 = R_{\square} \cdot A, \quad (2.2)$$

kde A je zistený počet štvorcov, spočítaný odpor druhého motívu je $R_2 = 63,72 \text{ } \Omega$. Tento motív pri uvažovaní dvoch použitých keramických substrátov by dosahoval dvojnásobnú výslednú hodnotu odporu $R_{M2} = 127,44 \text{ } \Omega$.

Rovnako ako pri prvom testovacom motíve bude pri vytváraní vodivých plôch tohto motívu použitá rovnaká vodivá pasta ESL 9912-K na základe striebra s rezistivitou $2,5 \text{ m}\Omega/\square$. Rozmery vodivých plôch sú v tomto prípade 10 x 10 mm, z čoho vyplýva počet štvorcov $A = 1$. Výsledná hodnota odporu vodivých plôch tohto navrhnutého motívu je $2,5 \text{ m}\Omega$.



Obr. 16 Znáznomený druhý motív meandrového typu

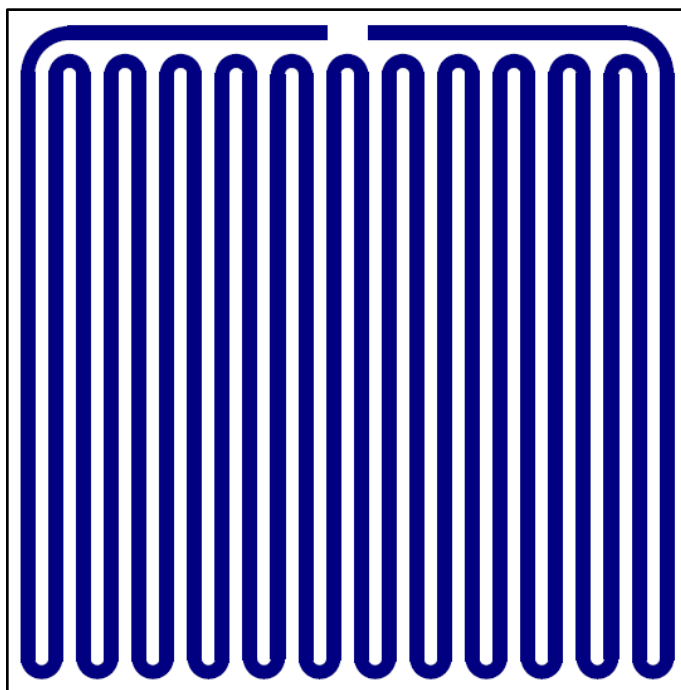
2.2 Návrh optimalizovaného motívu

Z poznatkov získaných v semestrálnej práci pri pokusoch a následnom testovaní bola pre navrhnuté optimalizované topné teleso použitá vodivá pasta, ktorá by rovnomernejšie rozviedla teplo po celom povrchu telesa. Podobne bol zjemnený aj navrhnutý motív, ktorý mal tiež meandrový tvar ako už odskúšané teleso v semestrálnej práci, no so zhustením motívu sme dosiahli aj vyšší počet štvorcov. Výber substrátu, na ktorý bol navrhnutý motív zostal ponechaný, čiže substrátom je korundová keramika Al_2O_3 s výhodou vysokých pracovných teplôt potrebných pre zariadenie hot plate. Rozmery substrátov zostali rovnaké ako v prípade testovacích telies v semestrálnej práci, to znamená že boli použité rovnaké štandardne vyrábané veľkosti keramických substrátov 105 x 105 mm s hrúbkou 1 mm.

V ďalšom kroku bolo potrebné spočítať počet štvorcov motívu meandrového typu podobne ako v prípade testovacích motívov a dosadiť do nasledujúceho vzorca 2.3. Najskôr bol zvolený rozmer jedného štvorca motívu (2 x 2 mm) vzhľadom k výslednému potrebnému dosiahnutému odporu. Dôležitý bol fakt, že zistený počet štvorcov v rohoch daného motívu bol násobený číslom 0,56 z dôvodu polovičnej prúdovej hustoty. [34] Získaný počet štvorcov optimalizovaného motívu sa bude rovnáť hodnote 1171,88. Pri výrobe tohto motívu bola zvolená spomínaná vodivá pasta typu ESL 5545 s definovanou rezistivitou $\rho_{\square} = 300 \text{ m}\Omega/\square$. Po definovaní a zistení týchto parametrov, boli tieto následne dosadené do tohto vzorca:

$$R_2 = \rho_{\square} \cdot A, \quad (2.3)$$

kde A je získaný počet štvorcov motívu a ρ_{\square} je rezistivita použitej vodivej pasty. Vypočítaný odpor finálneho optimalizovaného motívu by mal dosahovať hodnotu $R_2 = 351,56 \Omega$. Optimalizovaný navrhnutý motív možno vidieť na obrázku Obr. 17.

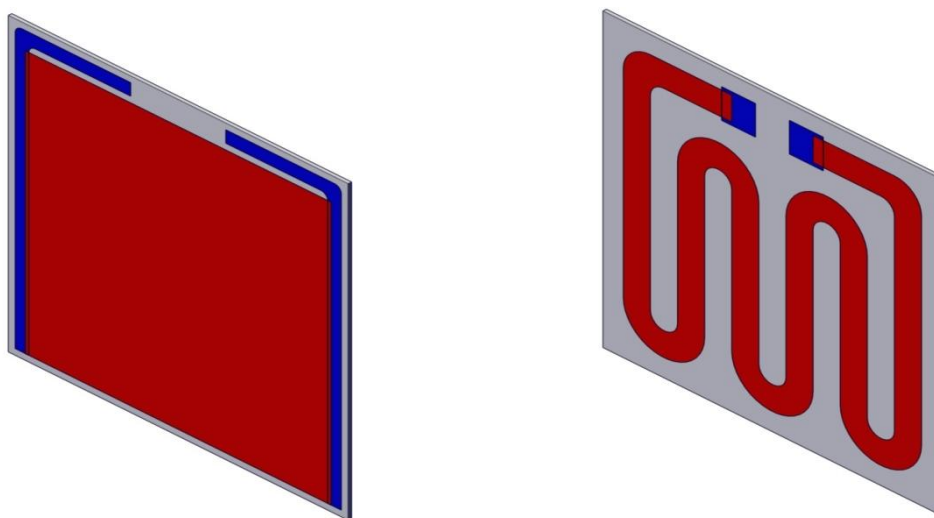


Obr. 17 Optimalizovaný návrh motívu

Po výrobe týchto motívov boli namerané podobné hodnoty odporov topných elementov rovné približne hodnotám $100\ \Omega$ ($R_{\text{MOPT}} = 97,2\ \Omega$), čo bolo pravdepodobne spôsobené problémom natlačenia vodivej pasty na substrát, kedy bolo nutné viackrát opakovať tlač daného motívu na dostupnej sieťotlačí, v dôsledku čoho bola hrúbka vodivej vrstvy po výpale o niečo vyššia, čím došlo k zníženiu výsledného odporu motívu. Táto odchýlka bola podobná ako pri realizovaných testovacích motívoch v semestrálnej práci.

2.3 Návrh modelu a teplotné simulácie

Pre simulácie boli vytvorené v programe SOLIDWORKS 2016 modely, resp. digitálne dvojčatá oboch navrhnutých testovacích odporových motívov a optimalizovaného vodivého motívu na keramickom substráte. Vytvorené modely boli simulované v simulačnom programe ANSYS Workbench 17.1, resp. ANSYS Workbench 2020 R1. Obidva modely pozostávajú z keramického substrátu, vodivých plôch a navrhnutého odporového motívu. Keramický substrát je v oboch prípadoch rovnaký a má rozmery $105 \times 105\ \text{mm}$ s definovanou hrúbkou $1\ \text{mm}$. Vodivé plochy prvého motívu sú orientované na kraj substrátu a odporový motív v tvare štvorca (zjednodušený návrh testovacieho motívu) má v tomto prípade rozmery $90 \times 90\ \text{mm}$ s predpokladanou hrúbkou vrstvy $25\ \mu\text{m}$ (vid' Obr. 18 vľavo). Druhý model má vodivé plochy umiestnené do stredu substrátu a navrhnutý odporový motív meandrového typu má šírku $8\ \text{mm}$ s rovnakou hrúbkou vrstvy $25\ \mu\text{m}$ (vid' Obr. 18 vpravo). Pre názornosť a odlišenie častí oboch modelov boli priradené k jednotlivým súčastiam príslušné farby.

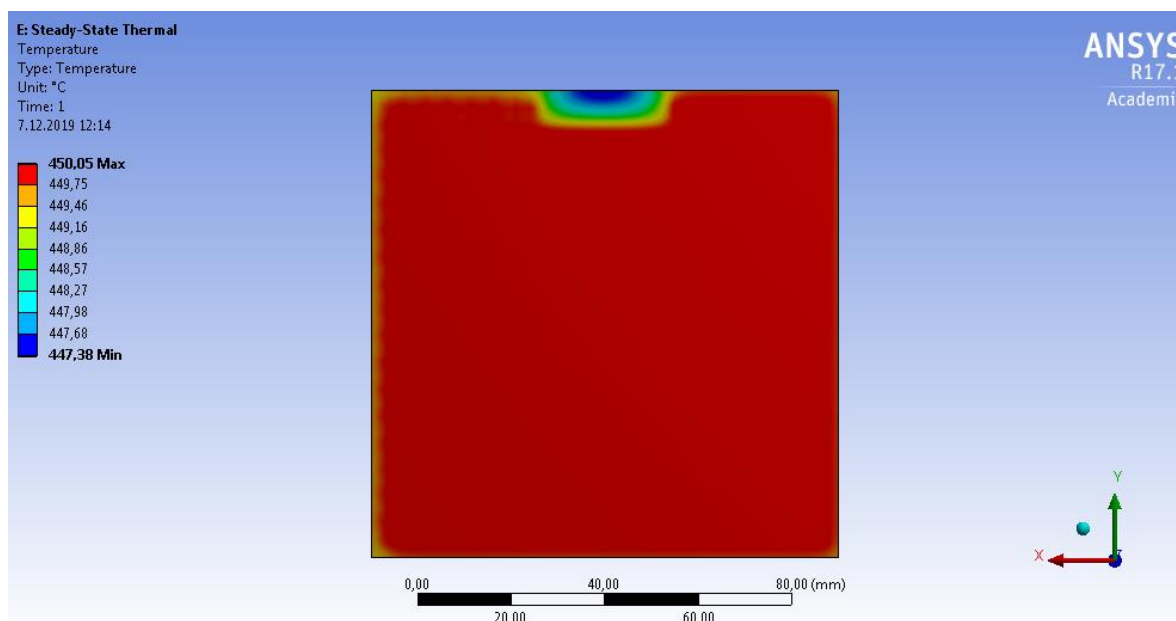


Obr. 18 Navrhnuté 3D modely simulovaných odporových motívov

Po vytvorení potrebných modelov nasledovalo nastavenie simulácií. V prvom kroku pred každou simuláciou bola do pracovného prostredia vložená geometria príslušného modelu. Ďalej bolo možné k danej geometrii priradiť požadovaný typ simulácie. V nasledovných simuláciách bol využitý typ teplotnej analýzy s názvom Steady-State Thermal Analysis. Následne bolo potrebné do knižnice materiálov pridať požadované materiály, ktoré budú využité pri simulácii. Potom bolo možné prejsť do mechanickej časti programu, kde nasledoval veľmi dôležitý krok pre výsledok

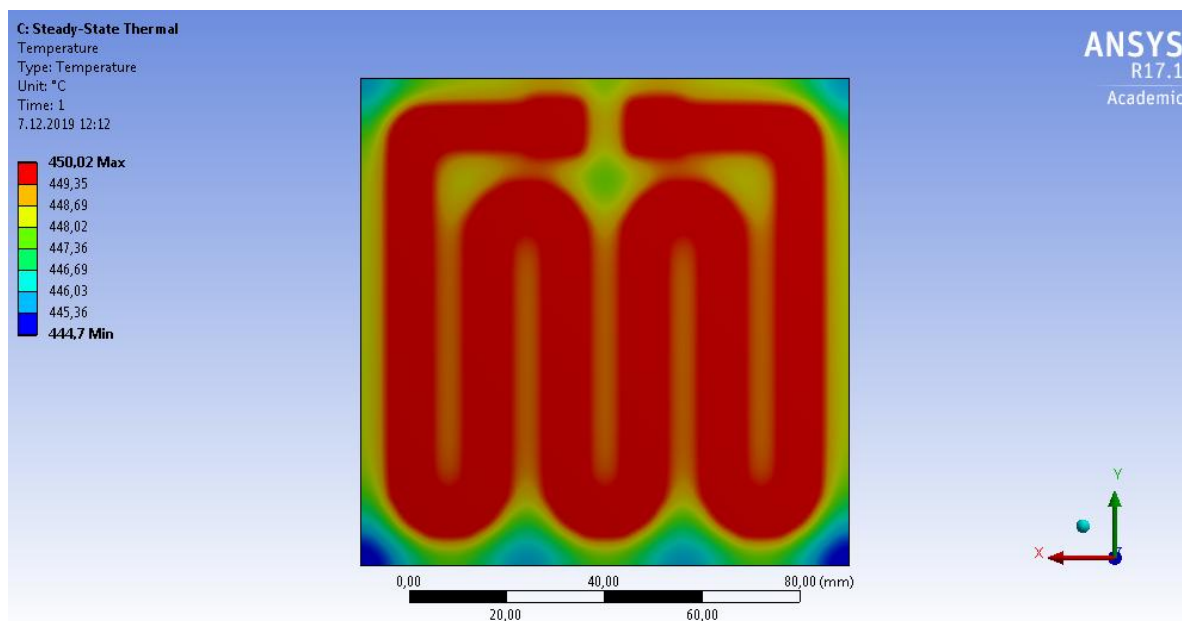
simulácie – tzv. zosieťovanie (mesh), kde bola nastavená jemnosť siete pre jednotlivé časti modelu. Výsledok a čas simulácie je výrazne ovplyvnený jemnosťou siete. Z toho dôvodu sieť odporovej vrstvy bola nastavená najjemnejšia, pretože bude zahrievať keramický substrát. V ďalšom kroku bola k odporovému motívu definovaná teplota, ktorá by mala byť dosiahnutá. Potom bola na spodnú časť modelu priradená prirodzená konvekcia, keďže táto časť bude umiestnená na vzduchu. Nakoniec na bočné steny a hornú časť modelu bola pridaná podmienka dokonale izolované (Perfectly insulated), čím bola zaistená izolácia topného elementu. V poslednom kroku bolo do výsledkov pridané rozloženie teploty na povrchu, čím boli získané požadované výsledky teplotnej analýzy.

Na nasledujúcom obrázku Obr. 19 možno vidieť rozloženie teploty pri teplotnej simulácii prvého testovacieho motívu. Boli zistené určité rozdiely teploty v rôznych miestach na substráte vzhľadom k polohe odporového motívu. Tieto rozdiely dosahovali približne 3 °C, čo bolo v súlade so stanoveným cieľom a boli viditeľné najmä v hornej časti keramického substrátu na miestach, kde sú pripojené vodivé plochy.



Obr. 19 Rozloženie teploty v prípade prvého testovacieho motívu

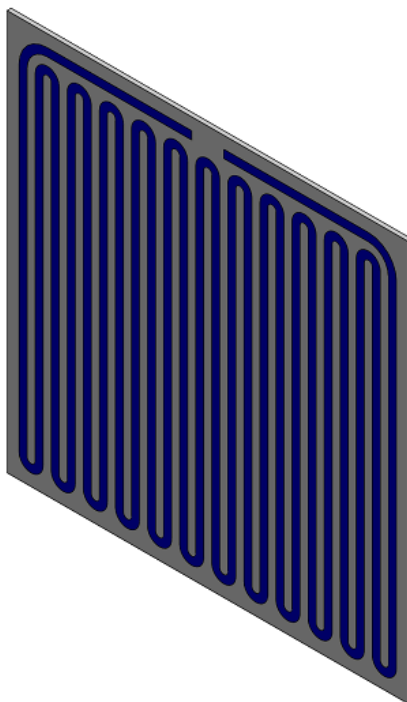
Pre porovnanie na obrázku Obr. 20 je zobrazená teplota v prípade modelu druhého testovacieho motívu meandrového typu pri realizovanej teplotnej simulácii. Pri tomto modeli je teplota rovnomerne rozložená po celej ploche (rozdiel teplôt 1 až 2 °C), s výnimkou všetkých štyroch rohov keramického substrátu, kde možno zaznamenať rozdiel teplôt 4 až 5 °C voči ostatným miestam na substráte.



Obr. 20 Zobrazenie rozloženia teploty pri druhom motíve

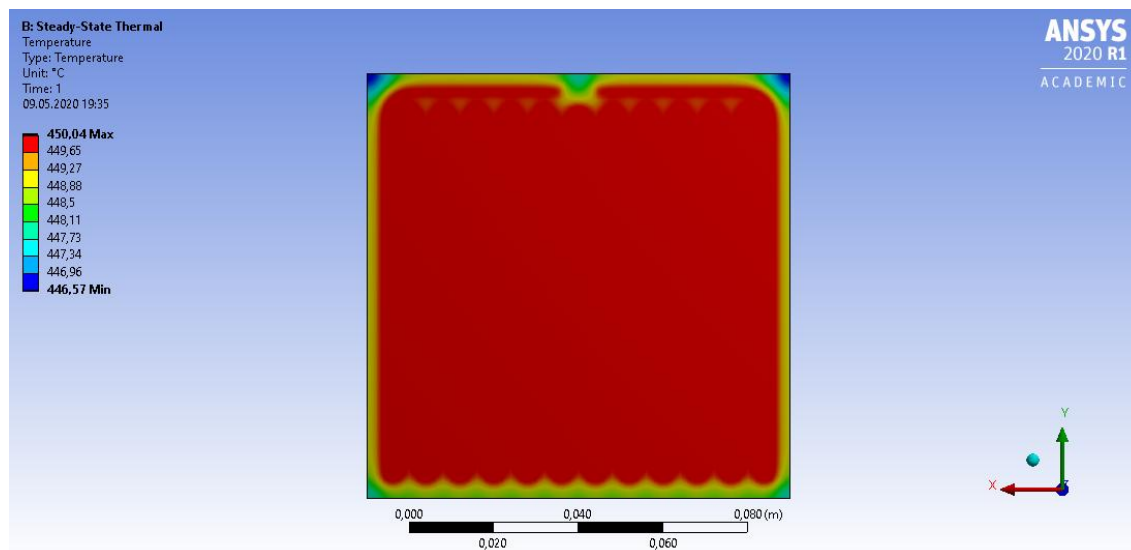
Model a simulácia optimalizovaného motívu

V nadväzujúcej diplomovej práci bol jedným z cieľov navrhnuť optimalizovaný motív topného telesa. V prvom kroku bol vytvorený simulačný model v programe SOLIDWORKS 2016 rovnako ako testovacie motívy v semestrálnej práci. Na rozdiel od týchto motívov, bola v prípade finálneho motívu použitá iba vodivá pasta. Pre názornosť modelu je zobrazená táto vrstva motívu modrou farbou a výsledný model možno vidieť na obrázku Obr. 21.



Obr. 21 3D model optimalizovaného topného telesa

Vytvorený model bol simulovaný v najnovšej verzii programu ANSYS Workbench 2020 R1. Následne bolo potrebné nastaviť požadované simulácie, kedy bol zvolený rovnaký typ teplotnej analýzy Steady-State Thermal Analysis a analogicky ako v prípade testovacích motívov v semestrálnej práci boli nastavené jednotlivé počiatočné podmienky simulácii (temperature, convection a perfectly insulated). Najdôležitejším krokom bolo nastavenie tzv. zosieťovania (mesh), pretože z dôvodu zložitejšieho tvaru meandrového typu motívu bolo potrebné výrazne zjemniť veľkosť prvku siete, a tým pádom táto časť simulácie trvala dlhší čas ako v prípade jednoduchých testovacích motívov.



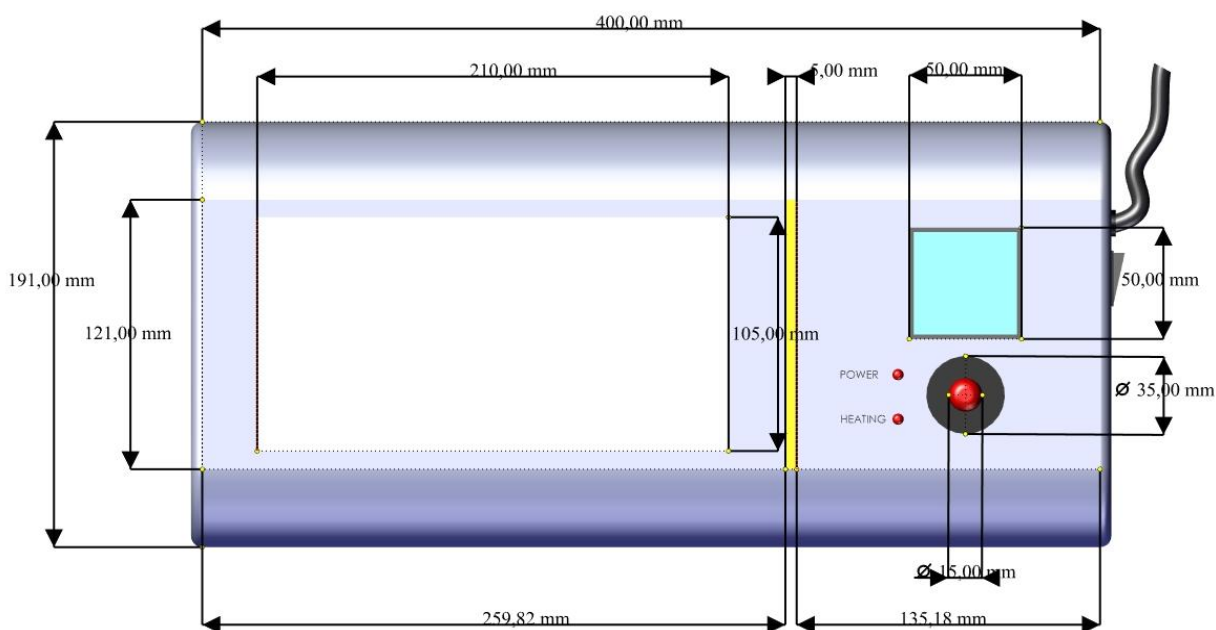
Obr. 22 Pohľad na rozloženie teploty pri optimalizovanom motíve

Na hore uvedenom obrázku Obr. 22 je zobrazený výsledok simulácie finálneho motívu topného elementu. V porovnaní s testovacím motívom na obrázku Obr. 20 možno vidieť rovnomerné rozloženie teploty po celom substráte, pričom výraznejší rozdiel teplôt je iba na krajoch substrátu. Pri teplotnej simulácii tohto motívu bolo s výhodou získané aj rozloženie teploty po celom substráte podobne ako v prípade testovacieho motívu na obrázku Obr. 19, s tým že bola dosiahnutá výrazná úspora materiálu, a teda rozloženie teploty na celej ploche substrátu zostalo zachované (rozdiel teplôt 1 až 2 °C).

2.4 Návrh konštrukcie zariadenia

V prípade návrhu konštrukcie topnej dosky sa vychádzalo z úvahy použitia kovového materiálu. Z dôvodu, čo najjednoduchšej a najdostupnejšej metódy sa uvažovalo o použití hliníkových profilov s vyhovujúcim tvarom, ktoré by sa následne upravili do požadovaných rozmerov. Prvotný návrh modelu bol navrhnutý v programe SOLIDWORKS 2016, kde je realizované riešenie prívetivé najmä z hľadiska dizajnu, z čoho vyplýva, že z dôvodu využitia jednoduchších konštrukčných prvkov môže byť výsledný dizajn zariadenia mierne odlišný. Najskôr je na nasledujúcom obrázku (viď Obr. 23) zobrazená konštrukcia zariadenia z horného pohľadu, kde možno vidieť

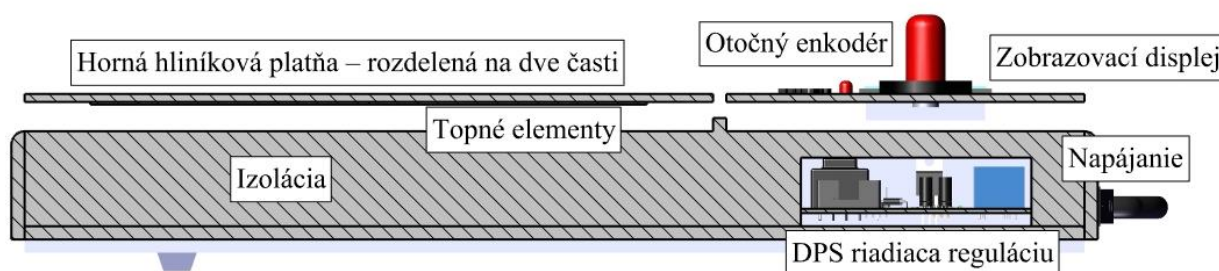
všetky prvky a súčasti, ktoré bude horný panel konštrukcie zariadenia obsahovať. Na danom obrázku sú znázornené aj jednotlivé kóty všetkých potrebných rozmerov pre zhotovenie výslednej konštrukcie. Vzhľadom na zobrazený pohľad zhora, možno túto plochu rozdeliť na dve časti. V pravej časti sú rozložené ovládacie a zobrazovací prvok. Na ovládanie bude slúžiť otočný enkodér so stupnicou, ktorý bude regulovať teplotu ohrevu topného prvku. Prvotne ako zobrazovací prvok bol zvolený OLED displej príslušných rozmerov, na ktorom bude zobrazená aktuálna teplota a nastavená teplota, ktorá bude nastavovaná otočným kolíkom pre reguláciu. Vedľa otočného potenciometra budú umiestnené signalizačné diódy, z ktorých jedna (hore) bude indikovať zapnutý hot plate a druhá (dole) bude znamenať zahrievanie na požadovanú teplotu. V časti na ľavo sa bude nachádzať kovová hliníková doska, na ktorú bude zo spodnej časti pripevnený navrhnutý motív natlačený na keramických substrátoch, čiže topný element. V tejto časti bude dôležité, aby bola kovová doska teplotne oddelená od ostatnej konštrukcie, čo znamená použitie izolácie aby nedochádzalo k ohrevu, prípadnému prehriatiu konštrukcie. Ako izoláciu bude potrebné použiť izolačný materiál, ktorý má vysokú teplotnú odolnosť (napr. minerálna vlna, čadičové vlákna atď.), pretože teplota bude v danej oblasti dosahovať až 400 °C. V tejto časti textu boli rozobrané súčasti konštrukcie, ktoré budú pre užívateľa viditeľné, čiže bude môcť regulovať a nastavovať teplotu povrchu topného prvku.



Obr. 23 Pohľad zhora konštrukcie topnej dosky

V nasledovnej časti danej kapitoly bude popísaná problematika usporiadania funkčných zložiek výsledného skonštruovaného hot plate. V prípade realizácie virtuálneho rezu z prednej časti zariadenia možno vidieť jeho jadro, resp. vnútornú časť (viď Obr. 24). Pri prvom pohľade je viditeľný obrys kovovej konštrukcie, určitej hrúbky, ktorá ešte bude spresnená. Pod vyhrievacou kovovou platňou bude pripevnený topný element, ktorý by mal dosahovať výkon približne do 700 W, z dôvodu dosiahnutia požadovanej teploty 400 °C na povrchu kovovej platne. Topný prvok bude mať rozmery 210 x 105 mm (dva keramické substráty 105 x 105 mm) s hrúbkou 1 mm,

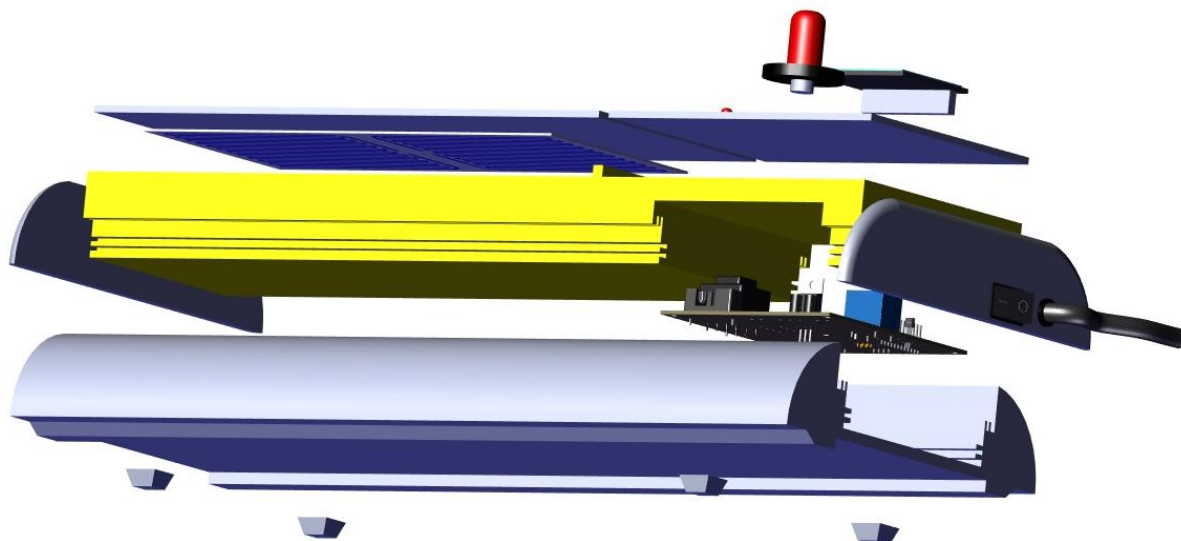
typickou pre keramické substráty. V tejto časti možno vidieť aj spojenie dvoch keramických substrátov navzájom, ktoré budú pripojené k elektronike. Elektronika sa bude nachádzať pripevnená na spodnej časti konštrukcie v dostupnej drážke duralového profilu v pravej časti zariadenia pod ovládacími prvkami. V časti topného prvku bude použitá aj izolácia, ktorá je dôležitá vzhľadom k ostatným častiam celkovej konštrukcie. Riešenie by bolo možné umiestnením topného prvku do hliníkového profilu, jeho odizolovanie vo vnútri hliníkového profilu a následné odizolovanie samotného hliníkového profilu, ktorý by mohol byť pripevnený ku konštrukcii. Táto úvaha bola prebratá z konštrukčného riešenia súčasne používaného hot plate v laboratórnych cvičeniach, ktoré má byť nahradené daným navrhnutým a vyrobeným hot plate. Z pravej časti bude vyvedený kábel na pripojenie zariadenia do elektrickej siete (viď Obr. 24). Vedľa tohto prívodného kábla bude umiestnený vypínač slúžiaci na jednoduché vypnutie a zapnutie hot plate, aby nebolo potrebné neustále pripájať a odpájať kábel z elektrickej siete. Pripojenie vypínača a sieťového kábla bude riešené spojením z elektronickej časti najjednoduchším dostupným spôsobom pomocou osadených svorkovnic.



Obr. 24 Zobrazenie virtuálneho rezu z prednej časti hot plate

Na obrázku Obr. 25 je názorne ukázaný spôsob spojenia jednotlivých častí konštrukcie zariadenia, z ktorých je zložené. V spodnej časti možno vidieť navrhnuté nožičky hot plate, pričom v snahe vylúčiť zložitosť bude použité jednoduchšie dostupné konštrukčné riešenie – plastové nožičky. Tieto nohy sú pripevnené pomocou aplikovaného lepidla na ich vrchnej strane k spodnej časti konštrukcie. Aby bola možná výmena, prípadne oprava a modifikácia elektroniky bude potrebná oddelená horná platňa, na ktorej sú umiestnené topné prvky pripevnené k spodnej časti duralového profilu držiakmi stĺpkami pomocou dostupných skrutiek alebo tepelne izolačným lepidlom s vhodnou teplotnou odolnosťou. Otočný enkodér bude pripojený k elektronike a vyvedený na povrch v hornej časti pod displej. OLED displej, ktorého pripojenie bude viesť z elektronickej časti, bude potrebné pripevniť na povrch nad otočný kolík so stupnicou. Topný prvok nachádzajúci sa na hornej platni z hliníka bude k tejto platni pripevnený pomocou tepelne vodivého lepidla, z dôvodu vedenia tepla na povrchu kovovej platne. Možnosťou bude použitie tepelne vodivého lepidla od výrobcu P-D Refractories s názvom Rudokit so žiaruvzdornosťou do 1350 °C, pričom je možné ho používať pri daných materiáloch (kov a keramika). Pod týmito

prvkami bude izolácia, ktorá zabezpečí odizolovanie ostatnej konštrukcie od rozohriatych keramických substrátov (topných telies).



Obr. 25 Prehľadné zobrazenie jednotlivých častí hot plate a ich usporiadanie

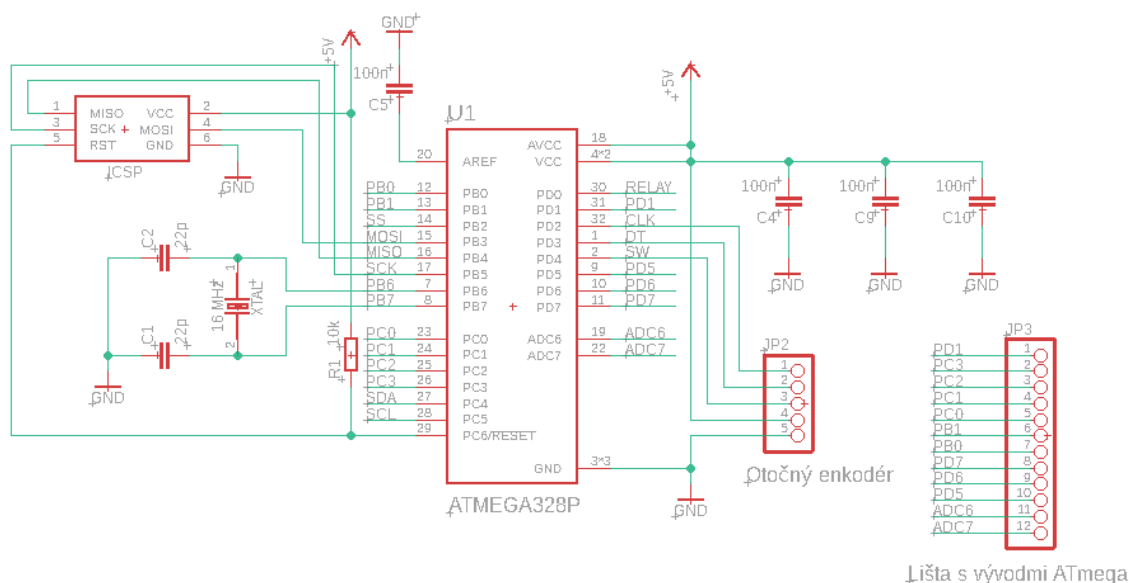
2.5 Návrh elektronickej časti

Táto časť výsledného zariadenia hot plate bude zabezpečovať reguláciu teploty topného telesa. Ďalej bude možné pomocou otočného potenciometru nastaviť požadovanú teplotu, ktorú bude následne možné vidieť na OLED displeji a sledovať jej zmeny. V prípade regulácie bude použitý typ PID regulácie. V nasledujúcej časti budú popísané jednotlivé komponenty elektronickej časti výsledného zariadenia.

Procesor ATMEGA 328P

Ide o 8-bitový mikrokontrolér založený na architektúre AVR RISC vyrábaný spoločnosťou Microchip. V prípade elektronickej časti ide o dôležitú súčasť a jej riadiacu jednotku. Tento procesor obsahuje v prípade použitého TQFP puzdra 32 vývodov, z ktorých je 23 vstupne-výstupných vývodov. Puzdro TQFP bolo použité najmä z dôvodu úspory miesta na doske plošného spoja a z hľadiska jednoduchšej montáže. Tento čip je vo veľkej miere využívaný vo vývojových doskách s obchodným názvom Arduino a podľa odporúčaného zapojenia boli ku všetkým napájacím vývodom pripojené blokovacie kondenzátory s doporučenými hodnotami 100 nF (viditeľné na obrázku Obr. 26, kondenzátory – C4, C5, C9 a C10). Ďalej možno vidieť ošetrový vývod RESET, ktorý slúži na resetovanie procesora, tým že je paralelne k napájaniu pripojený na tento vývod rezistor s doporučenou hodnotou 10 k Ω . Finálne programovanie procesora bude prebiehať pomocou ICSP konektora, ktorý možno vidieť v ľavej časti obrázka Obr. 26 a je zapojený ku procesoru podľa dostupného katalógového listu. Dôležitou časťou procesora je pripojený kryštál, ktorý bol zvolený s frekvenciou 16 MHz, pričom k nemu bolo potrebné pripojiť kondenzátory s definovanou hodnotou 22 pF (viď C1 a C2) podľa datasheetu. [35] V pravej časti tohto obrázka možno vidieť dodatočne vyvedené vývody z procesora, ktoré bude možné

použiť v prípade potreby počas programovania a finalizovania výsledného zariadenia hot plate podľa dostupnej konštrukcie zariadenia.



Lišta s vývodmi ATmega

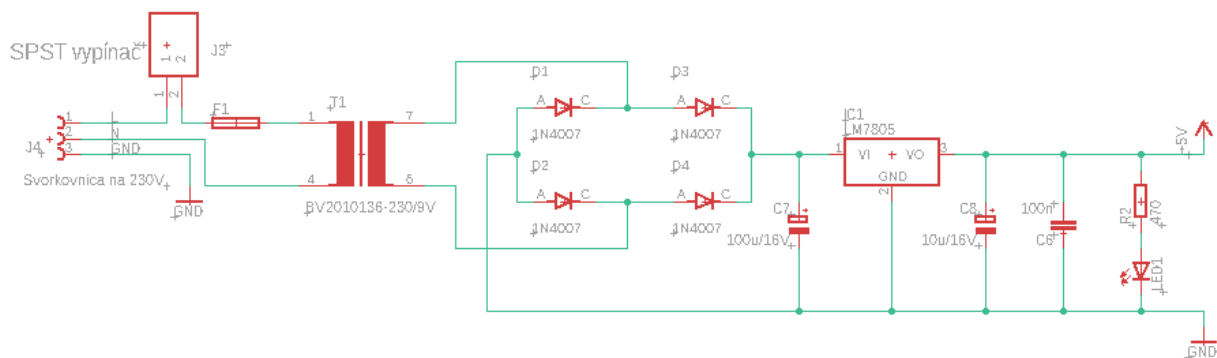
Obr. 26 Schematický návrh procesora ATmega 328P s externým oscilátorom, blokovacími kondenzátormi a ICSP konektorom, pripojenie otočného enkóderu a dodatočne vyvedené vývody z procesora

Otočný enkodér

V schéme znázornenej na obrázku Obr. 26 možno vidieť, že z riadiaceho mikrokontroléra ATmega 328P je vyvedených 5 pinov na pripojenie rotačného enkóderu. V prípade riešenia výslednej konštrukcie ešte nebolo určené najvýhodnejšie rozloženie ovládacích prvkov a z toho dôvodu boli tieto potrebné piny vyvedené a následne pomocou prepojuvácich káblov podľa potreby bude daný modul rotačného enkóderu pripojený. S výhodou je tu využívaná možnosť pripojiť dostupné moduly jednotlivých prvkov použitému procesoru známemu z vývojových dosiek Arduino. Modul otočný enkodér je tvorený 5 vývodmi – GND (pripojenie na zem), VCC (napájací pin), SW (slúži na aktiváciu tlačidla enkóderu), DT (výstupný impulz, ktorý oneskorí CLK o 90°), CLK (primárny výstupný impulz, ktorý určuje rozsah rotácie). Na predchádzajúcom obrázku je viditeľné pripojenie jednotlivých vývodov k procesoru a ich pomenovanie. [36]

OLED displej

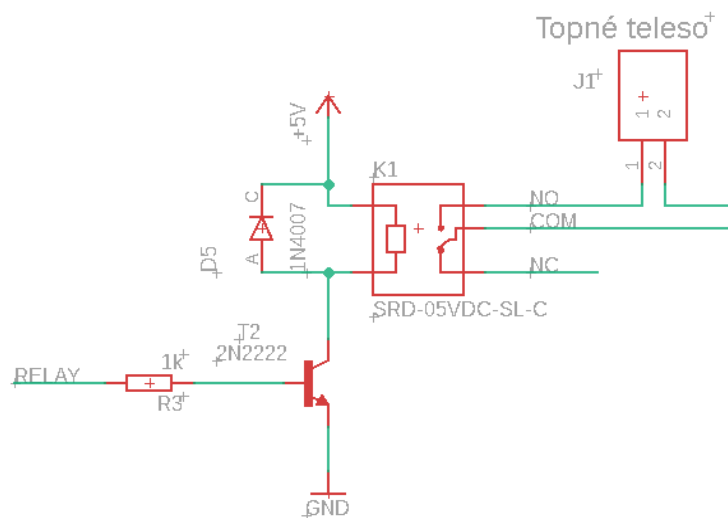
Na navrhované zariadenie bol zvolený OLED displej s bielymi znakmi, ktorý dosahuje vyššieho rozlíšenia (128 x 64 bodov) a nižšiu spotrebu. V prípade pripojenia zobrazovacieho displeja boli rovnako ako pri rotačnom enkodéri iba vyvedené tentokrát 4 vývody, čím je zaistené pohodlnejšie pripojenie a umiestnenie displeja vo výslednej konštrukcii zariadenia hot plate. Na pripojenie OLED displeja s procesorom je potrebné pripojiť 4 vodiče (viď Obr. 27). Vývod VCC prepojíme s pinom + 5 V, GND so zemou a v prípade zvyšných dvoch pinov postupujeme podľa datasheetu, v ktorom sú definované prepojenia pinov SDA s A4 a SCL s A5 na procesore. [37]



Obr. 28 Schéma zapojenia napájacieho obvodu a transformované napätie 230 V/9 V

Spínanie relé

Typ regulácie, ktorú bude zabezpečovať jadro celej elektronickej časti – procesor ATmega 328P, bude fungovať na základe spínania relé tranzistorom. Bol zvolený tranzistor typu 2N2222, pred ktorý je pripojený rezistor s vypočítanou odpovedajúcou hodnotou odporu. Paralelne so zvoleným relé (typ SRD určený na napätie 5 V) je zapojená dióda 1N4007, ktorá pri zapínaní slúži ako ochrana relé. [40] Relé následne spína topné teleso sieťovým napätím. Na predchádzajúcom obrázku Obr. 29 je zobrazené schematické zapojenie spínania topného telesa.

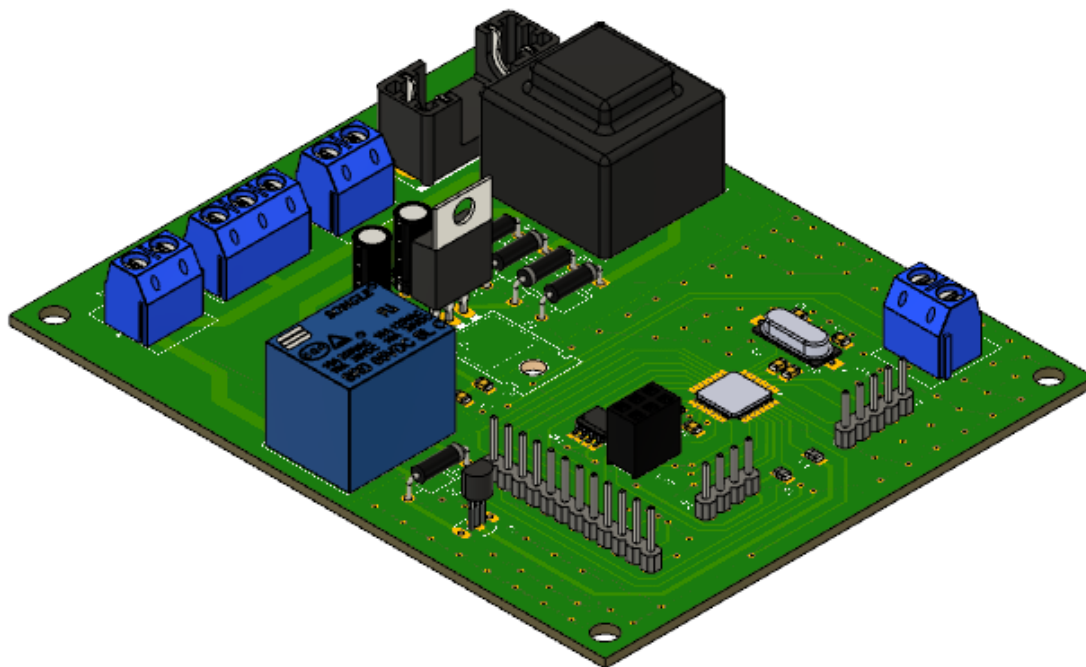


Obr. 29 Časť obvodu znázorňujúca spínanie topného telesa pomocou relé

Popis DPS

V tejto časti návrhu elektronickej časti bude popísané rozmiestenie jednotlivých komponentov na doske plošného spoja daného systému. Schematický a následne aj návrh DPS bol realizovaný v programe EAGLE 9.5.2, z ktorého boli následne exportované dáta do programu Autodesk Fusion 360 za účelom vytvorenia 3D modelu navrhovanej DPS. Na obrázku Obr. 30 možno vidieť 3D pohľad navrhovanej DPS. DPS možno rozdeliť na dve časti (ľavá a pravá polovica), kedy v ľavej polovici sa pracuje so sieťovým napätím, čiže táto časť je oddelená od zvyšných elektronických

prvkov pracujúcich s napätím + 5 V. V ľavej časti sa nachádzajú prvky ako transformátor, relé, usmerňovacie diódy a regulátor napätia s odpovedajúcimi kondenzátormi. Na okraji DPS možno vidieť svorkovnice pre pripojenie komponentov, ktoré budú výhodne pripojené vzhľadom ku konštrukcii finálneho hot plate. V hornej časti vedľa transformátora bol využitý poistkový držiak do DPS, vďaka čomu možno využiť tavnú poistku, ktorú bude možné v prípade potreby vymeniť. V pravej časti sa nachádzajú výlučne komponenty, ktoré riadi mikrokontrolér ATmega 328P s napájacím napätím + 5 V. Sú viditeľné súčiastky ako teplotný senzor MAX6675, ICSP konektor na programovanie, procesor ATmega 328P a k nemu pripojený kryštál. Okolo týchto prvkov sú umiestnené konektory na pripojenie rotačného enkodéra a OLED displeja, pričom budú s výhodou využité vzhľadom k finálnej podobe konštrukcie zariadenia. Dôležité z dôvodu prúdového zaťaženia vodičov bola ich šírka a izolačná vzdialenosť, kedy v časti sieťového napájania bola zvolená odporúčaná šírka 2 mm (podľa kalkúlátora) s minimálnou izolačnou vzdialenosťou 3 mm. Zatiaľ čo v pravej polovici pri ostatných elektronických komponentoch bola v návrhových pravidlách definovaná šírka vodičov 0,3 mm (výnimka pri vodičoch + 5 V – 0,5 mm) s rovnakou minimálnou izolačnou vzdialenosťou. V rohoch DPS budú vyvŕtané otvory s priemerom 4 mm určené na uchytenie DPS v presnom mieste konštrukcie. Rozmery DPS boli definované podľa dostupného materiálu na konštrukciu kedy šírka je 106 mm a dĺžka 87 mm, ktorú bolo dôležité získať čo najmenšiu z dôvodu použitia ostatných prvkov v konštrukcii a šetrenia priestoru. Hrúbka DPS získaná z vygenerovaného výrobného súboru z programu EAGLE bola stanovená na 1,57 mm.



Obr. 30 3D zobrazenie navrhutej DPS elektronickej časti zariadenia

2.6 Voľba materiálov

Po návrhu 3D modelu v programe SOLIDWORKS 2016 bolo potrebné z dostupných možností vyhľadať a zvoliť vhodné typy materiálov, či už pre konštrukciu zariadenia, upevnenie a prepojenie jednotlivých prvkov, odizolovanie a pod.

Základom zariadenia topného telesa je jeho konštrukcia, ktorú bolo potrebné zvoliť z pevného a odolného materiálu s možnosťou úpravy pre výsledný dizajn hot plate. Prvotným nápadom bola voľba materiálu s tvarom podobným hliníkovým profilom, do ktorého by bolo možné vložiť a upevniť všetky komponenty. Bol zvolený dostupný profil z materiálu dural, ktorý je zliatinou hliníka s meďou a horčíkom a vo vnútri tela obsahuje drážku, kde je možné s výhodou umiestniť navrhnutú DPS a pevne pripevniť skrutkami. Na obrázku Obr. 31 možno vidieť duralový profil aj spolu s prvotným uvažovaným rozmiestnením jednotlivých komponentov. Dĺžka tohto profilu bude 400 mm.



Obr. 31 Duralový profil a uvažované rozmiestnenie jednotlivých častí

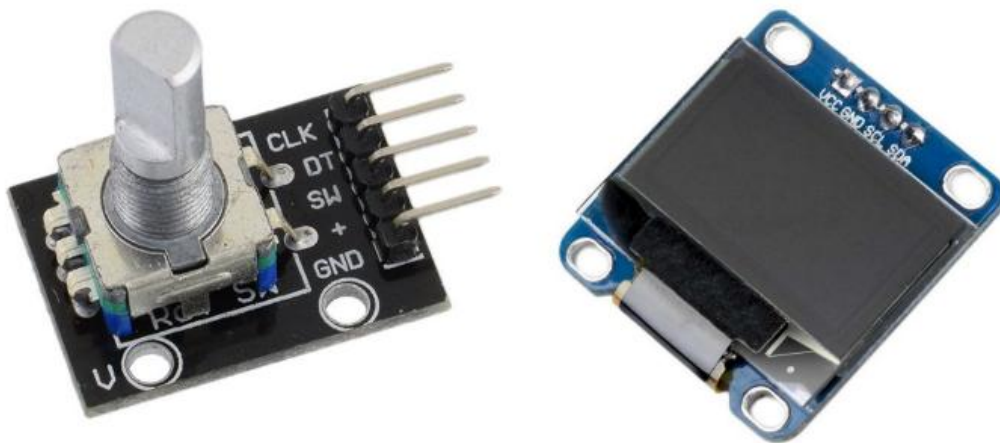
V ďalšej časti bolo nutné zaobstaráť hornú platňu, ktorá bude dosahovať požadovanú teplotu a plniť tak funkciu horúcej dosky. V tomto prípade bol vybratý hliníkový plech s hrúbkou 1,5 až 2 mm, pri počiatkových rozmeroch 200 x 400 mm (viď Obr. 32), ktorý bol následne upravený do odpovedajúcich rozmerov, aby bola pokrytá celá horná plocha duralového profilu. Na spodnú časť hliníkového plechu budú pripevnené dve topné telesá z keramického substrátu, ktoré boli vyrobené v predchádzajúcej fáze riešenie práce. Tieto topné telesá budú prilepené pomocou tepelne vodivého lepidla, aby bolo rozvedené teplo až na povrchu hornej hliníkovej platne. Aby bola zabezpečená spätná väzba PID regulácie pomocou termočlánku K, tento bude vhodne umiestnený pod hornou platňou, aby bola získaná odpovedajúca a presná teplota na jej povrchu. Správne umiestnenie termočlánku bude určené pomocou dostupných simulácií, ktoré zobrazia najviac optimálne miesto vzhľadom z rozloženia teploty na povrchu hot plate. Podľa dodatočnej simulácie dvoch topných telies umiestnených vedľa seba s medzerou približne 2–3 mm bolo zvolené vhodné miesto pre umiestnenie termočlánku typu K. Tento sa bude nachádzať v strede medzi dvomi topnými elementmi, kde bola zistená optimálna teplota vzhľadom k ostatným

miestam na povrchu topnej platne. Na okrajoch topných telies bola výraznejšia odchýlka, zatiaľ čo v strede medzi nimi dosahovala teplota hodnotu približne 397 až 400 °C, čo je v dobrom súlade s požadovanou teplotou 400 °C.



Obr. 32 Pohľad na zvolený hliníkový plech

Nakoniec je potrebné pomocou dostupných nástrojov upraviť hliníkový plech na bočné steny finálneho zariadenia. Najskôr bolo potrebné upraviť tento materiál do požadovaného tvaru bočných stien a následne umiestniť do týchto stien ovládacie a pripájacie prvky zariadenia ako sú vypínač a kábel na pripojenie napájacieho napätia. Na záver bolo potrebné do ovládacej časti hornej platne pridať ovládací (otočný enkodér) a zobrazovací prvok (OLED displej) a prepojiť ich pomocou prepojovacích káblov s elektronickou časťou – DPS (viď Obr. 33).



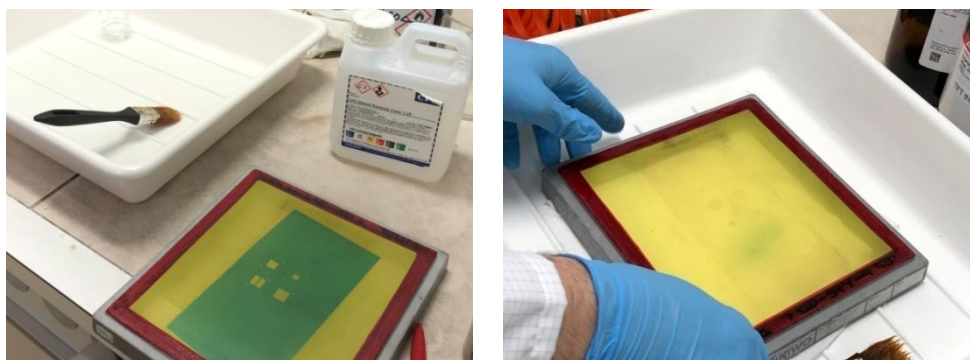
Obr. 33 Názorná ukážka otočného enkodéra a OLED displeja [36] [37]

3 VÝROBA TOPNÝCH ELEMENTOV

V tejto kapitole je popísaná praktická časť práce, ktorá pozostávala z čistenia použitého sita, z následného vytvorenia požadovaného motívu pre sieťotlač, z realizácie sieťotlače vybranou odporovou alebo vodivou pastou, jej následným výpalom v priebežnej vypaľovacej peci a záverečného testovania. Jednotlivé časti sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

3.1 Čistenie sita a vytvorenie motívu

V prvej fáze praktickej časti sa realizovala výroba testovacieho motívu na sito, prostredníctvom ktorého bol následne daný motív natlačený sieťotlačou na substrát. Najskôr zo všetkých dostupných sít v laboratóriu bolo vybrané vhodné sito. Toto sito bolo potrebné na začiatku očistiť, keďže pre daný testovací pokus nebolo kupované nové sito, ale bolo použité už používané sito. Prvý krok čistenia začal postupným odstraňovaním zelenej vrstvy fotocitlivej emulzie, ktorá bola viditeľná po predchádzajúcom motíve. V tomto prípade bol použitý dostupný prípravok CPS STENCIL REMOVER, ktorý pozostával zo zlúčeniny sodíka a štetcom, pomalými krúživými pohybmi bola odstraňovaná fotocitlivá emulzia, ktorá sa postupne rozpúšťala. Potom bola do prístroja s ultrazvukom (ultrazvuková čistička) napustená voda, a aby sa dokončilo čistenie rozpustenej fotocitlivej emulzie, nasledovalo spustenie ultrazvuku a ponorenie čisteného sita do vody. Ultrazvuk pôsobil približne 1 až 2 minúty, resp. čas bol zvolený podľa potreby. Na požadovaný testovací motív bolo použité plastové sito, ktoré bolo zhotovené z polyesteru a jeho parameter MESH bol rovný 325. V ďalšom kroku nasledovalo čistenie jemných nečistôt a pozostatkov na site, ktoré tam ešte zostali po predchádzajúcom vytvorení motívu, pričom bolo aplikované čistiace médium pod názvom CPS HAZE REMOVER. Na povrchu sita sa začala postupne tvoriť pena, čím dochádzalo k odstraňovaniu jemných nečistôt a po určitom čase bolo sito opäť vložené do ultrazvukovej čističky na daný čas. V tomto prípade bol dosiahnutý požadovaný výsledok očisteného sita. V prípade, kedy sú na povrchu viditeľné nejaké mastnoty, je možné použitie dostupného prípravku MESH PREPARATOR, prípadne kvapaliny so zložením podobným bežným čistiacim prostriedkom a nasleduje opätovné čistenie sita štetcom v daných miestach s mastnými plochami, ponorenie sita do vody a čistenie ultrazvukom. Na nasledujúcom obrázku Obr. 34 sú fotky pracoviska, kde vľavo sa nachádza pôvodné sito, ktoré bolo potrebné očistiť a vpravo je očistené sito.



Obr. 34 Fotografie pracoviska pri čistení sita

V prípade dostatočne očisteného sita je možné prejsť do ďalšej fáze praktickej časti, ktorou je osvit a vytvorenie požadovaného motívu na očistené sito. Postup pri osvietení a následného vytvorenia motívu na sito je nasledovný:

- 1) Príprava a použitie nádoby s dostatočnými rozmermi vzhľadom k veľkosti sita, ktorá sa naplnila destilovanou vodou. Očistené sito možno pomaly a jemne ponoriť do danej nádoby tak, aby nastalo vytvorenie stabilnej vrstvy vody na celom povrchu sita, keďže v opačnom prípade by sa mohlo stať, že pri následnom oddeľovaní fotocitlivej emulzie by bola strhnutá aj časť nevytvrdennej masky.
- 2) Na vrchnú stranu sita bola položená fotocitlivá emulzia (výrazne zelená farba) s tým, že fólia (menej výrazná zelená farba) bola v ďalších krokoch strhnutá.
- 3) Potom bolo možné použiť pripravený valček na vytlačenie prebytočnej vody z povrchu sita, čo sa zopakovalo niekoľkokrát, až pokým nedošlo k vytlačeniu celého obsahu vody.
- 4) Z opačnej strany sita bola zároveň použitá špeciálna stierka, ktorá taktiež pomohla k zbaveniu sa prebytočnej vody.
- 5) Nasledovalo sušenie fénom, na ktorom sa nastavila možnosť fúkania vzduchu s teplotou okolia, čiže fotocitlivá emulzia sa nezahrievala, dochádzalo iba k jemnému ofúkaniu z oboch strán sita.
- 6) Potom bolo dôležité opatrné strhnutie, resp. oddelenie fólie fotocitlivej emulzie zo sita.
- 7) Takto pripravené sito bolo možné vložiť zariadenia na osvit s vákuovou vývevou. Vytlačený motív na filmovej predlohe sa prikladal na sito spodnou stranu, čiže bolo možné vidieť vrchnú stranu natlačenú na fólii. Sito sa vkladalo do tohto zariadenia vrchnou stranou nadol a dôležité bolo zaistenie, aby vo vnútri sita zostala šnúrka, ktorá aktivovala vákuovú vývevu, a zabezpečila tak odsatie vzduchu v celom okolí sita. Zariadenie na osvit obsahovalo dve clony, ktoré boli následne otočným ovládaním nasmerované dole a nasledovala príprava odpočtu definovaného času. Na stopkách bolo potrebné dodržať odpočet 45 až 47 sekúnd, potom sa clony vytiahli. V prípade presiahnutia daného času by mohlo dôjsť k problémom, kedy by sa mohla presvietiť aj časť motívu (tmavá časť na filmovej predlohe), čím by došlo k jej čiastočnému vytvrdeniu a pri odstraňovaní fotocitlivej emulzie oplachom, by sa daná časť požadovaného motívu nedala odstrániť a zostala by na site.

- 8) Teraz bolo možné vybrať sito z osvitového zariadenia a opatrne oddeliť fóliu s natlačeným motívom od sita. Toto oddeľovanie bolo s miernymi problémami, no nakoniec bol dosiahnutý požadovaný prenesený obrazec na fotocitlivej emulzii.
- 9) Sito s požadovaným preneseným obrazcom bolo postupne oplachované pod miernym prúdom vody, až pokým sa fotocitlivá emulzia nevyplavila a neodstránila preč zo sita. Na zelenom pozadí na site bol žltou farbou viditeľný výsledný požadovaný motív.
- 10) Posledným krokom bolo finálne dotvrdenie, resp. vytvrdenie motívu na site pomocou dostupného fěnu, kde sa tento raz nastavila voľba fúkania teplého vzduchu a postupne sa vysušili obidve strany sita.
- 11) Na site sa tak vytvoril požadovaný motív, ktorý bol pripravený na sieťotlač.

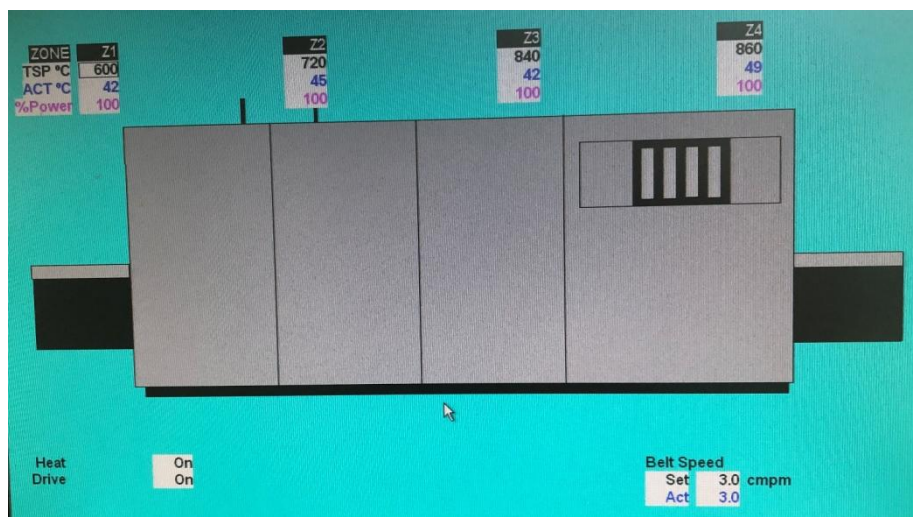
Na obrázku Obr. 35 je zobrazený finálny vytvorený testovací motív na dostupnom site, ktorý bol v ďalšej fáze použitý pri sieťotlači na nanášanie odporovej pasty na substrát.



Obr. 35 Zobrazenie výsledného vytvoreného motívu na site

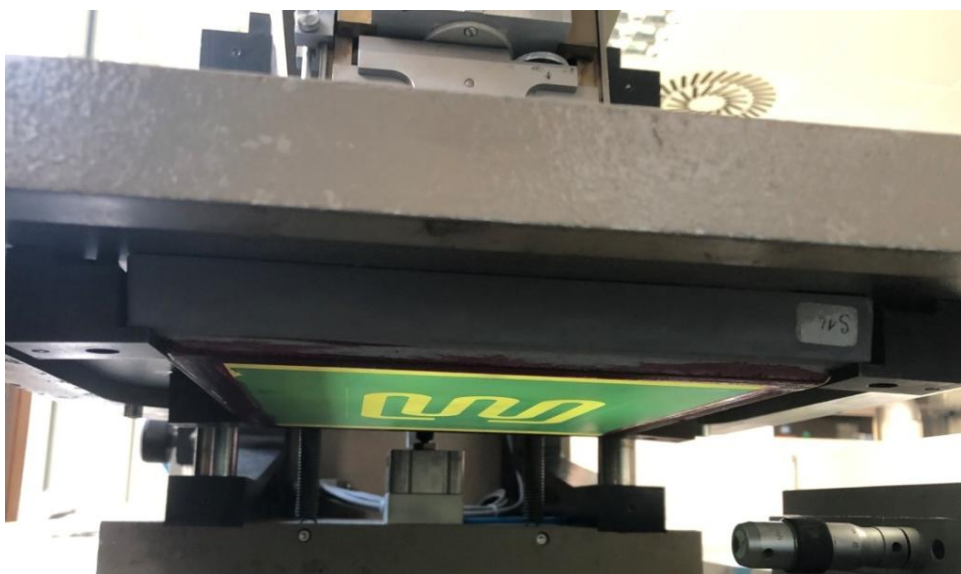
3.2 Sieťotlač a výpal pasty

V tejto fáze výroby topných telies boli realizované natlačenie pasty na substrát a následný výpal. V prvom kroku bolo potrebné spustiť priebežnú vypaľovaciu pec z dôvodu dlhšieho nárastu teplôt v jednotlivých zónach pece. V softvéri na počítači bol potvrdený výber pripraveného vypaľovacieho profilu, kedy sa začali teploty postupne zvyšovať (viď Obr. 36). Používaná pasta nemala definovaný špecifický vypaľovací profil, bolo potrebné dosiahnuť jediný parameter – vrcholovú teplotu 850 °C.



Obr. 36 Grafické rozhranie pece pri zvyšovaní teploty vybraného teplotného profilu

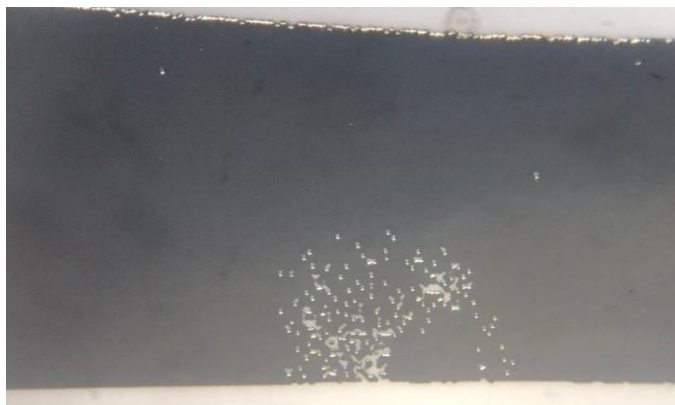
Počas doby kedy sa teplota v peci postupne zvyšovala, bola realizovaná samotná sieťotlač. Na sieťotlač bolo použité zariadenie s názvom AUREL C880 screen printer. V predchádzajúcich krokoch pripravené sito s požadovaným motívom bolo pripevnené zo spodnej strany spomenutej sieťotlače a pevne uchytené uchyovacím mechanizmom (viď Obr. 37).



Obr. 37 Fotografia upevneného sita na sieťotlačovom zariadení

Následne bola do držiaka pripevnená stierka s odpovedajúcimi rozmermi vzhľadom k rozmerom substrátu. Medzitým bola pripravená pasta rozmiešaná vhodným nástrojom, aby získala požadovanú viskozitu a vlastnosti pre tlač (pred každým použitím je potrebné pastu odvážiť a zapísať do príslušného zoznamu pre ďalšie použitie). Potom bol keramický substrát s definovanými rozmermi upevnený do držiaceho stolíka za prípadnej pomoci pinzety, aby substrát úplne dosadal na pomocné kolíky stolíka. Následným posunom držiaceho stolíka bolo aktivované vákuum, čím bol keramický substrát pevne upevnený. V ďalšom kroku bolo potrebné zosúladiť sito s požadovaným motívom a keramický substrát, a zároveň bol nastavený

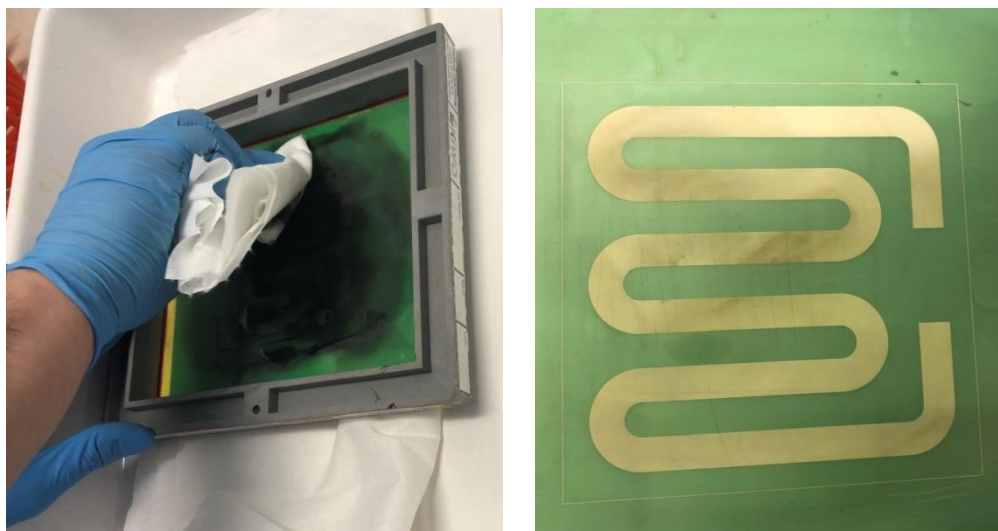
dostatočný odtrh sita od substrátu (mal by dosahovať hodnoty 0,8 až 1,2 krát hrúbky príslušného substrátu). Ďalším dôležitým parametrom je prítlak stierky, ktorý bol nastavovaný otočným kolíkom na hornej strane zariadenia a následne vyskúšaný pomocou dostupnej fólie. Dôležité pre správne natlačenie pasty bolo umiestnenie stierky v úplnej rovine, pretože aj minimálne naklonenie do určitej strany by mohlo znamenať problémy pri natlačenej paste, tzn. že pasta by mohla byť nanosená v určitých miestach nerovnomerne. Po správnom nastavení všetkých parametrov bola na sito nanosená rozmiešaná pasta a spustená automatická tlač na sieťotlačí. Nanášaná bola pripravená pasta typu ESL 3910 s vrstvovým odporom $1 \Omega/\square$. Z dôvodu odskúšania správneho nastavenia bol najskôr použitý testovací substrát. Prvý pokus nebol úspešný, bol odhalený mierny náklon stierky, ktorý sa v ďalšom kroku upravil a výsledkom bola správne a rovnomerne natlačená pasta na keramickom substráte. Pri optickej kontrole substrátu bol zistený problém vynechania určitých miest na požadovanom motíve (viď Obr. 38).



Obr. 38 Pozorované chýbajúce miesta pasty na vytlačennom motíve pod mikroskopom

Toto bolo zapríčinené nedostatočným oplachom fotorezistu, ktorý v niektorých okách sita ešte zostal, a tak cez dané miesta nebola natlačená pasta na substrát. Pomocou mikroskopu a jemného nástroja s ostrým hrotom podobný špendlíku, bol vzniknutý problém dostatočne vyriešený, kedy jemnými pohybmi bola do chýbajúcich miest opatrne nanosená pasta. Po oprave boli keramické substráty na určitý čas odložené na stabilné miesto.

Popritom bolo potrebné použité sito očistiť od zvyšku pasty, aby bolo možné jeho opätovné použitie. Na nasledujúcom obrázku Obr. 39 možno vidieť proces čistenia prebytkov pasty a očistené sito. Zvyšná pasta na site sa čistila pomocou bezvláknovej utierky, ktorá bola navlhčená xylénom, prípadne bol xylén naliaty na sito. V tomto prípade čistenia bol spustený aj digestor, pretože dochádzalo k odparovaniu škodlivých látok.



Obr. 39 Proces čistenia zvyškov pasty a očistené sito

V ďalšej fáze bolo pripravené zariadenie na sušenie, kde bola nastavená teplota 150 °C. Do tohto zariadenia boli postupne vložené obidva natlačené substráty a po čase 10 minút boli vytiahnuté a pripravené na výpal.

Nakoniec boli substráty položené na dopravník priebežnej vypaľovacej pece (viď Obr. 40). Doba v peci bola v tomto prípade približne 90 minút, pričom táto doba závisela od nastavenej rýchlosti dopravníka (nastavenie 3 cm/min). Pri vkladaní do pece bolo dôležité pred natlačené keramické substráty zaradiť navyše ešte ďalší z dôvodu vykompenzovania teploty. Po dokončení výpalu bolo potrebné nastaviť pripravený chladiaci profil, ktorým sa pec nechá schladiť aspoň na 300 °C. Potom je možné vypnutie a voľné chladenie vypaľovacej pece.



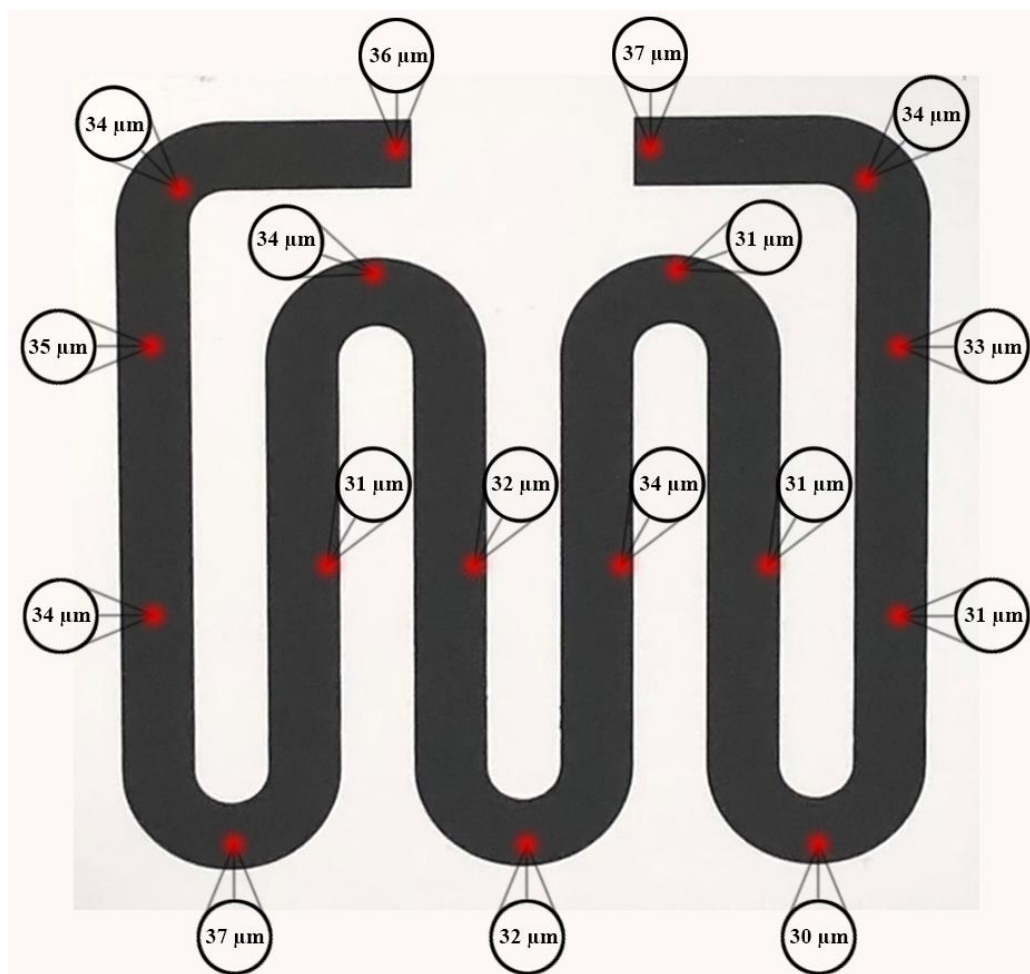
Obr. 40 Fotografia keramických substrátov pripravených na výpal pri vstupe do pece

3.3 Meranie a testovanie

Po realizovanom výpale keramických substrátov nasledovalo meranie odporu výsledného motívu. Toto meranie sa uskutočnilo dvojvodičovou metódou, ktorá sa bežne používa pri odporoch s hodnotou vyššou ako $10\ \Omega$. Pri meraní bola zmeraná hodnota odporu testovacieho motívu $R_{MT0} = 350\ \Omega$, čo nezodpovedalo predpokladom výpočtov. Príčinou bola tenšia vrstva ($10\ \mu\text{m}$) natlačeného motívu po výpale vzhľadom k očakávaniam. To znamenalo, že tenšia vrstva bude vykazovať vyšší odpor, čiže očakávaná hrubšia vrstva (približne $20\ \mu\text{m}$) by dosahovala nižšieho požadovaného odporu. Hrúbka vrstvy bola zistená pomocou dostupného mikroskopu, kedy pomocou prvého zaostrenia na pozorovaný keramický substrát a následným jemným posunom na stupnici a druhým zaostrením na motív bol odčítaný posun pri prechode medzi dvomi zaostreniami.

V tomto prípade bolo potrebné testovací motív upraviť na požadovaný odpor. Úprava bola sprevádzaná aj s opravou motívu na site (odstránenie zostatkov fotocitlivej emulzie na site), čo sa realizovalo pomocou prípravku CPS STENCIL REMOVER a jemným čistením v daných miestach sita. V tomto prípade bolo riziko poškodenia ostatných častí na site, čo sa nestalo a sito bolo úspešne očistené. Potom nasledovala opätovná tlač na sieťotlači, kedy bol dosiahnutý správne natlačený motív na keramickom substráte (odstránenie predchádzajúcich chýbajúcich miest na motíve). Následne prebehlo sušenie počas definovanej teploty a času, a nakoniec boli pripravené keramické substráty vložené na dopravník priebežnej vypaľovacej pece.

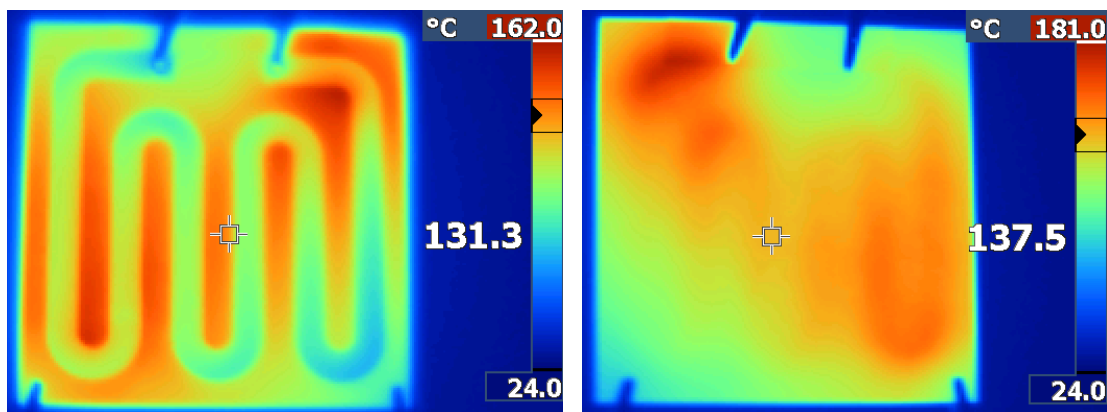
Po úprave testovacieho motívu bol daný motív vypálený s dostatočnou hrúbkou. Následne boli opäť zmerané hodnoty odporu vypálených motívov $R_{MT1} = 31,48\ \Omega$, resp. $R_{MT2} = 30,58\ \Omega$ pomocou dvojvodičovej metódy. Tieto hodnoty boli približne dvakrát menšie oproti vypočítanej hodnote $R_2 = 63,72\ \Omega$, čo bolo spôsobené opätovnou tlačou na opravovaný keramický substrát, čím bola dosiahnutá ešte hrubšia vrstva ako predpokladaná, a tým sa ešte viac znížila hodnota výsledného odporu motívu. Realizovanou opravou prvotného motívu vznikli aj mierne nerovnomernosti nanesej vrstvy pasty na substrát. Tento problém bol zistený pomocou merania na mikroskope, kedy na rôznych miestach testovacieho motívu boli zmerané rôzne hrúbky odporovej vrstvy. Zistené rozdiely boli iba v jednotkách mikrometrov. Týmto nerovnomernostiam je možné predísť správnym nastavením stierky a jej prítlaku, a zároveň tento problém vznikol predovšetkým kvôli oprave testovacieho motívu, kedy po získaných skúsenostiach bude v ďalšej fáze finálny motív pre topné teleso realizovaný správne. Na nasledujúcom obrázku Obr. 41 sú znázornené jednotlivé odmerané hrúbky odporovej vrstvy na rôznych miestach natlačeného motívu na keramickom substráte.



Obr. 41 Znáznornenie zmeraných hrúbok vrstvy na rôznych miestach motívu

3.4 Zahriatie testovacieho keramického substrátu

V poslednej fáze praktickej časti bol realizovaný pokus vyhriatia keramického substrátu odporovým motívom. Najskôr bol testovaný substrát upevnený tak, aby jeho poloha bola stabilná, čím sa jednoduchšie pozorovala aktuálna teplota. Potom boli na odporový motív pripojené dostupné svorky a bol spustený zdroj napájacieho napätia. Nastavené napätie bolo 32 V a prúd tečúci odporovým motívom bol 1,1 A. V prvom kroku bol pozorovaný keramický substrát zo strany vypáleného odporového motívu. Pozorovanie teploty na jednotlivých miestach substrátu prebiehalo pomocou zapožičanej termokamery FLUKE Ti25. V tomto prípade bol výsledok skreslený z dôvodu rôznej odrazivosti, resp. emisivity svetla od daného povrchu, prípadne aj nerovnomerne natlačenou odporovou vrstvou. Čiže odporový motív sa pri tomto pozorovaní zahrieval menej, naopak obrysy a substrát bol zahriaty viac (viď Obr. 42 vľavo). Z toho dôvodu bol substrát otočený na spodnú stranu, kde bolo viditeľné zodpovedajúce zahriatie odporového motívu a postupné relatívne rovnomerné rozloženie teploty po celom povrchu (viď Obr. 42 vpravo). Rozsah teplôt bol v oboch prípadoch približne 135 až 180 °C. V tomto kroku bol overený jav, že odporový motív dokáže vyhriať keramický substrát na určitú teplotu, a teda bude schopný plniť úlohu topného prvku.



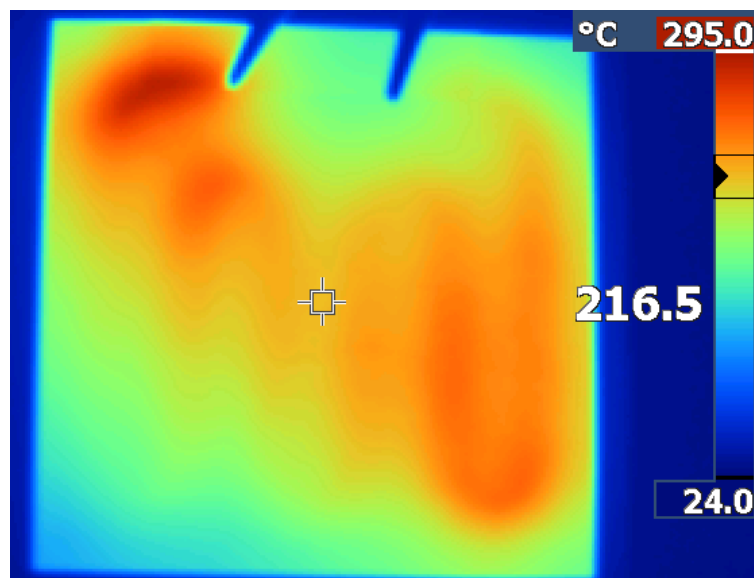
Obr. 42 Zobrazené rozloženie teploty na substráte pomocou termokamery

Nakoniec bol použitý výkonnejší zdroj napätia typu QXP1200SP LXI, kedy bol keramický substrát v stabilnej polohe a na odporový motív bolo dostupnými svorkami s pomocným vodičom pripojené napájacie napätie. Najskôr bolo napájacie napätie nastavené na maximálnu hodnotu 60 V s pretekajúcim prúdom 1,9 A, kedy sa keramický substrát dokázal rýchlo zahriať na teplotu presahujúcu 357 °C v danom mieste (maximálna teplota na danej termokamere). V tomto prípade došlo k prasknutiu jedného okraja substrátu (viď Obr. 43), čo bolo spôsobené prudkým nárastom teploty (vyhriatie trvalo približne 3 minúty) na keramickom substráte s následným prasknutím.



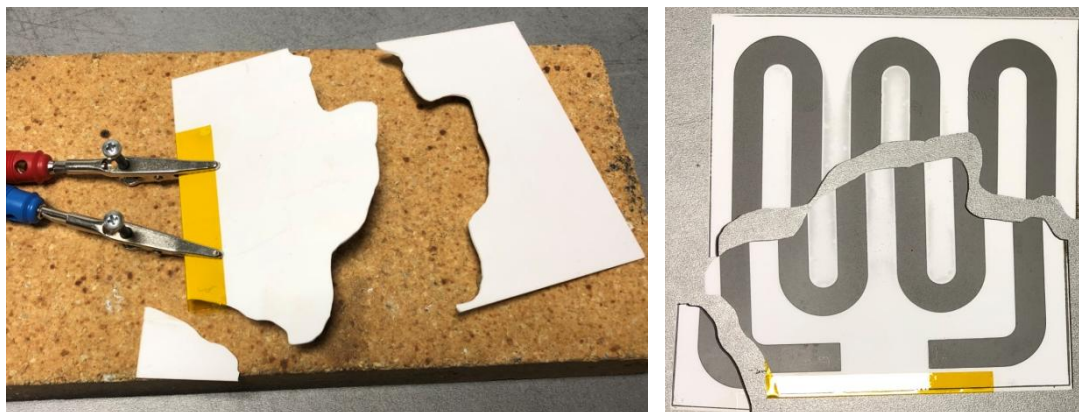
Obr. 43 Prasknutý keramický substrát po prudkom vyhriatí

V druhom prípade bolo realizované postupné zahriatie substrátu, kedy počiatočná hodnota napájacieho zdroja bola 30 V a 1,5 A, pričom teplota sa pri daných hodnotách pohybovala v rozsahu 150–220 °C. Rozloženie teploty na povrchu keramického substrátu pri postupnom zahrievaní možno vidieť na obrázku Obr. 44.



Obr. 44 Rozloženie teploty pri použití výkonnejšieho zdroja napätia

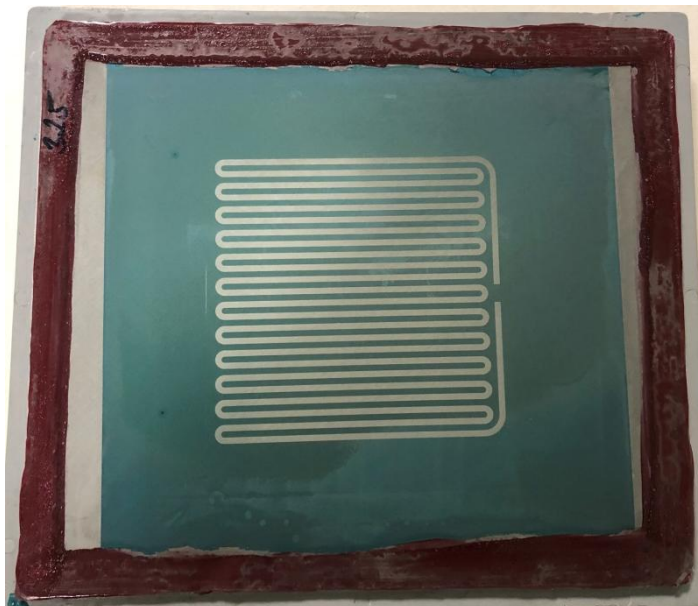
Nasledovalo postupné zvyšovanie napájacieho napätia až na hodnotu 55 V a 1,84 A, kedy hodnota najteplejšieho miesta na povrchu substrátu bola vyššia ako 357 °C, na protiľahlom okraji bola 330 °C a v strede teplota dosahovala hodnôt 280–300 °C. Po zvýšení napätia na 60 V keramický substrát opäť praskol (doba od zvýšenia napätia na maximálnu hodnotu – kratšia ako jedna minúta) a rozlomil sa na dve polovice a odlomený roh (viď Obr. 45), teplota sa o niečo zvýšila, no vzhľadom na merateľné maximum teploty danej termokamery nebola zmeraná. V tomto prípade príčinou rozlomenia keramického substrátu bolo nerovnomerné rozloženie teploty na celej ploche počas dlhšej doby (postupné zahrievanie trvalo približne 30 minút).



Obr. 45 Rozlomený keramický substrát pri postupnom zahrievaní

3.5 Výroba optimalizovaného motívu

Po návrhu optimalizovaného motívu v programe EAGLE 9.5.2 nasledovalo vytvorenie filmovej predlohy daného motívu, a ďalej analogicky ako pri testovacích motívoch v kapitole 3.1 prebiehala výroba šablóny. Najskôr bolo zvolené vhodné sito, ktoré sa očistilo a nakoniec bol vytvorený motív na danom site, ktorý možno vidieť na obrázku Obr. 46.



Obr. 46 Vyrobená šablóna optimalizovaného motívu

Následne bola realizovaná sieťotlač nového vytvoreného motívu rovnako ako v prípade testovacieho motívu na keramický substrát. Pri sieťotlačí sa objavili problémy v podobe pokazeného kompresoru na poloautomatickej sieťotlačí, ktoré sa podarilo odstrániť a mohlo byť prevedené požadované natlačenie motívu cez šablónu na keramický substrát. Pri tlači boli viditeľné nedostatočne natlačené motívy, z toho dôvodu bolo nutné opakovať viackrát. Niektoré natlačené motívy mali vo svojej štruktúre chýbajúce miesta bez vodivej pasty, ktoré bolo potrebné opraviť. Toto bolo realizované pomocou jemného nástroja, ktorým boli prázdne miesta v motíve vyplnené danou vodivou pastou. Následne po odstáti pripravených natlačených substrátov, bol dostatočný počet substrátov vložený do sušičky, odkiaľ zasúšené substráty smerovali do vypaľovacej pece pri nastavení definovaného teplotného profilu použitej vodivej pasty. Po výpale boli zmerané hodnoty odporov jednotlivých motívov a boli zistené odchýlky vzhľadom k vypočítaným hodnotám navrhnutého optimalizovaného vodivého motívu. Na obrázku Obr. 47 možno vidieť výsledné topné telesá po výpale.



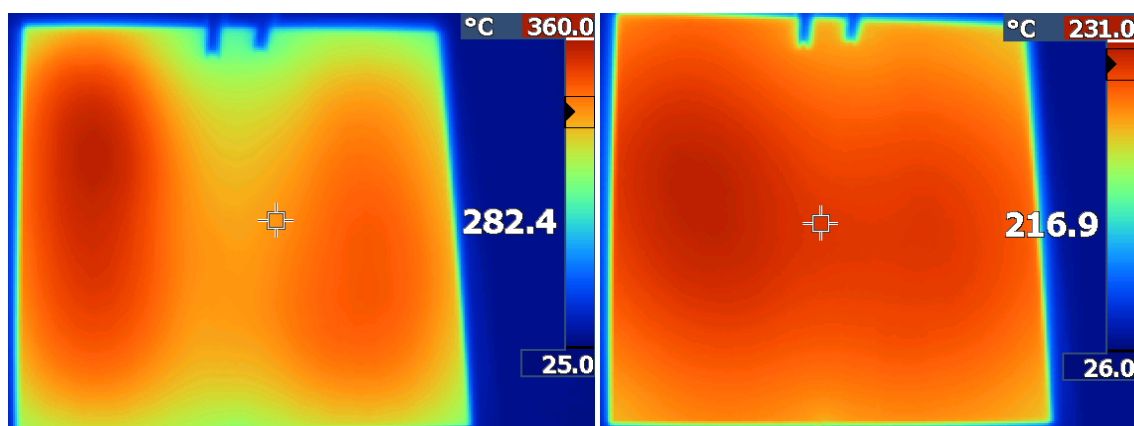
Obr. 47 Vypálené motívy, pripravené na umiestnenie do konštrukcie

V dôsledku opakovanej tlače daného motívu cez šablónu bola po výpale dosiahnutá vyššia hrúbka motívu, čím so zvyšujúcou sa hrúbkou vodivého motívu klesal výsledný odpor navrhnutého motívu. Vzhľadom ale k výkonu, ktorý je potrebné dosiahnuť sú získané hodnoty odporov $R_{\text{MOPT}} = 97,2 \, \Omega$ vyhovujúce a budú dostatočné pre dosiahnutie danej teploty na povrchu hot plate. Zistené hodnoty odporov jednotlivých vyrobených telies dosahovali podobné hodnoty približne $100 \, \Omega$.

3.6 Testovanie optimalizovaného motívu

Po výrobe nového motívu nasledovalo jeho testovanie a porovnanie rozloženia teploty vzhľadom k testovaciemu motívu. Toto testovanie prebiehalo najskôr pomocou laboratórneho zdroja napätia typu QXP1200SP LXI, kedy keramický substrát plniaci úlohu topného telesa bol pripevnený pomocou svoriek do stabilnej polohy, aby bolo možné pozorovanie rozloženia tepla na jeho povrchu termokamerou. Pri použití laboratórneho zdroja nastal problém s prúdovým obmedzením v dôsledku vysokého odporu topného telesa. Z toho dôvodu pri prvotnom testovaní bola získaná maximálna hodnota teploty približne $130 \, ^\circ\text{C}$, pričom pomocou termokamery bolo viditeľné požadované rovnomerné rozloženie teploty s odchýlkami $\pm 10 \, ^\circ\text{C}$ až $\pm 15 \, ^\circ\text{C}$, čo bolo podstatné zlepšenie voči testovaciemu motívu.

Z dôvodu obmedzenia maximálnej teploty na substráte bolo realizované alternatívne meranie pomocou autotransformátora s regulovaním sieťového napätia. Toto meranie prebiehalo postupne od nulového napätia, kedy pomaly s krokom $20 \, \text{V}$ sa napätie dostalo až na hodnotu $60 \, \text{V}$ s vyhriatym topným telesom na $120\text{--}150 \, ^\circ\text{C}$, čo bolo porovnateľné s použitým jednosmerným napätím pri prvom pokuse. Ďalej sieťové napätie dosiahlo hodnoty $100 \, \text{V}$ a teplota na povrchu sa pohybovala medzi hodnotami $210\text{--}230 \, ^\circ\text{C}$, pričom ďalším zvyšovaním napätia bola zaznamenaná teplota $350 \, ^\circ\text{C}$ pri $150 \, \text{V}$. Maximálna teplota bola dosiahnutá pri napätí $190 \, \text{V}$, kedy jej hodnota bola obmedzená rozsahom použitej termokamery – vyššia ako $370 \, ^\circ\text{C}$. Na tejto teplote sa postupne vyrovnávala teplota po celom povrchu keramického substrátu a možno povedať, že topný prvok reálne vydržal dané zaťaženie sieťovým napätím. Zaznamenané rozloženie teploty je na nasledujúcom obrázku Obr. 48.

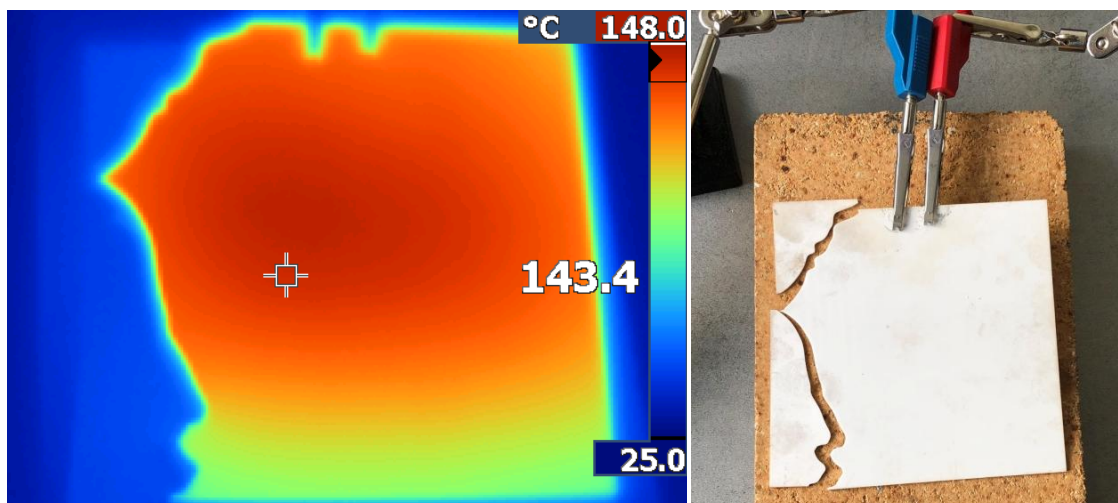


Obr. 48 Rozloženie tepla na povrchu substrátu – vľavo rýchle zahriatie na danú teplotu, vpravo postupné vyrovnanie teploty

Pre dokončenie pokusu bolo sieťové napätie zvýšené na maximálnu hodnotu, na ktorej vydržal testovaný topný element približne minútu, a potom nastala jeho deštrukcia – rozlomenie na tri časti (viď Obr. 49). Z toho dôvodu tento čas pri maximálnej hodnote sieťového napätia možno považovať za maximálnu dobu, počas ktorej môže byť topný element zopnutý, v opačnom prípade dôjde k jeho poškodeniu. Rozlomenie keramiky nastalo vo všetkých prípadoch pri teplote okolo 400 °C (presná hodnota nemohla byť zmeraná z dôvodu obmedzenia rozsahu dostupnej termokamery). Použité keramické substráty majú obmedzené mechanické vlastnosti pri vysokom tepelnom strese, z toho dôvodu výsledkom daného experimentu bolo tiež overenie tohto javu. Týmto boli zároveň stanovené maximálne prevádzkové podmienky, pri ktorých zostane zariadenie funkčné a nedôjde k jeho poškodeniu. Orientačné hodnoty teplôt a nastaveného sieťového napätia možno vidieť v tabuľke 6.

Tab. 6 Zapísané hodnoty napätí a teploty pri záverečnom meraní

Sieťové napätie [V]	Teplota [°C]
60	130
100	230
150	350
190	> 370
240	> 370 – deštrukcia telesa

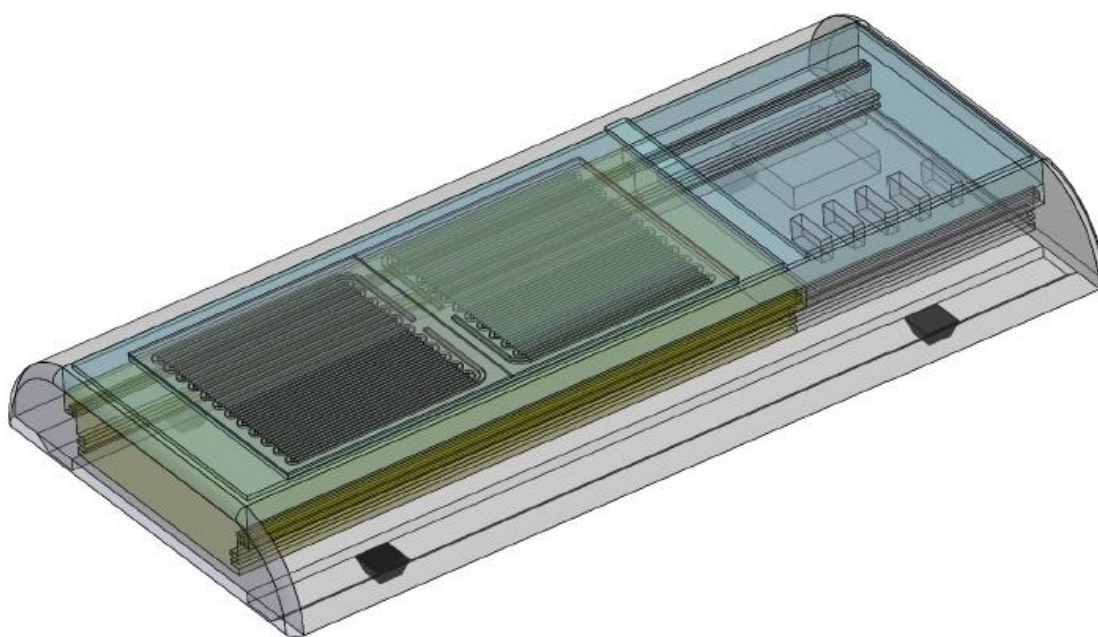


Obr. 49 Vpravo výsledok pokusu – rozlomenie na tri časti, vľavo poškodený substrát zobrazený termokamerou

Všetky testovania a pokusy realizované v tejto časti práce boli vyhodnotené pomocou termokamery FLUKE Ti25, na ktorej bolo pred prevedením merania potrebné nastaviť emisivitu povrchu daného objektu, aby boli výsledky čo najpresnejšie. Na získaných fotkách pomocou termokamery je pozorované relatívne rovnomerné rozloženie teploty (aj v porovnaní s testovacím motívom), čo bolo dosiahnuté správnym návrhom a následnou výrobou motívu topného prvku. V prípade určitých miest, kde možno vidieť dané nerovnomerné rozloženie tepla, to je spôsobené malými odchýlkami v hrúbke rozličných miest na motíve, či rôznymi nehomogenitami na povrchu keramického substrátu (zapríčinia zmenu tepelnej vodivosti), prípadne emisivitou povrchu a aktuálnym osvetlením v miestnosti. Navyše na termokamere nebol viditeľný obrys motívu, ktorý bol navrhnutý dostatočne na husto, a tým sme dosiahli opäť výrazné zlepšenie, keďže pri pozorovaní testovacích motívov bol viditeľný obrys motívu, a teda aj výrazné nerovnomernosti z hľadiska rozloženia tepla na povrchu.

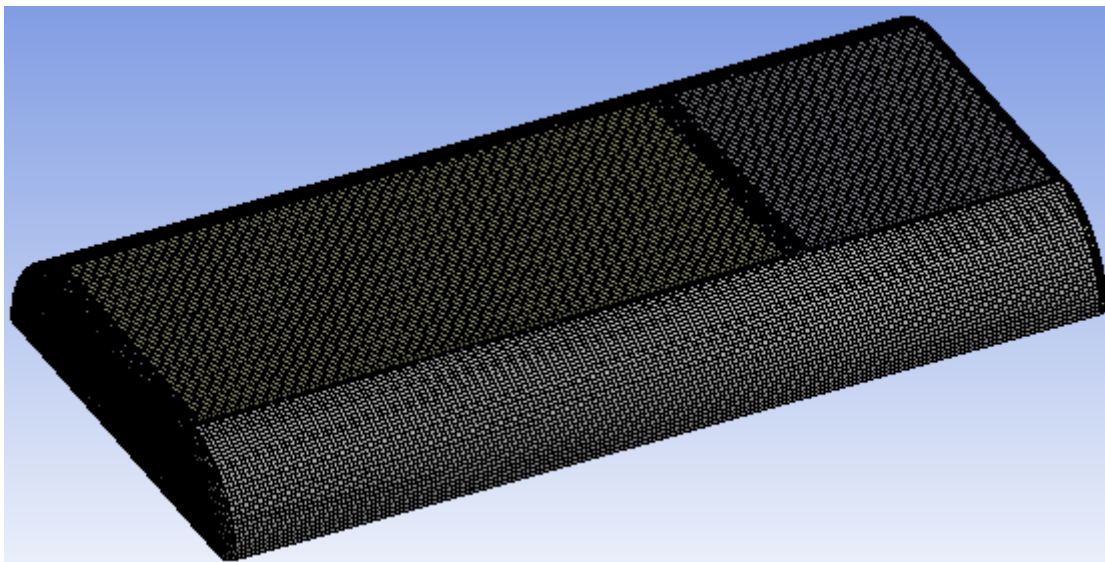
4 SIMULÁCIE PRENOSOV TEPLA V ZARIADENÍ

V tejto časti diplomovej práce budú zobrazené simulácie konečnej podoby vytvoreného a navrhnutého modelu zariadenia hot plate. V prvom kroku bol vytvorený model zariadenia, rovnako ako v prípade detailného návrhu v kapitole 2.4, pričom cieľom bolo spomenutý model zjednodušiť o nepotrebné prvky, čím sa časovo aj výpočtovo zjednoduší výsledná simulácia prestupu tepla. Model zobrazený na obrázku Obr. 50 bol vytvorený rovnako ako predchádzajúce modely v programe SOLIDWORKS 2016 pre simuláciu vo verzii ANSYS Workbench 2020 R1 (pre názornosť modelu boli vynechané dištančné stĺpiky).



Obr. 50 Model zariadenia vytvorený pre simulácie prestupu tepla

Následne bolo možné pracovať s vytvoreným modelom v simulačnom programe, v ktorom bolo nutné nastaviť všetky potrebné vlastnosti jednotlivých častí modelu. Najskôr podľa dostupných informácií boli vytvorené, resp. priradené definované materiály jednotlivým častiam. Bol vytvorený materiál pre izoláciu podľa špecifických hodnôt tepelnej vodivosti z katalógového listu a ostatné materiály boli zvolené z dostupného zoznamu materiálov v programe. Potom bolo možné prejsť k nastaveniu všetkých dôležitých parametrov pre správnu simuláciu. Aj v tomto prípade bol zvolený typ Steady-State Thermal Analysis – statická teplotná simulácia. V prvom kroku bolo realizované definovanie veľkosti elementov pre sieť (mesh) modelu (viď Obr. 51), kde najjemnejšia sieť bola zvolená pri keramických substrátoch s motívom – veľkosť prvku 1 mm (hrúbka vodivého motívu na keramickom substráte bola upravená z dôvodu vysokej časovej náročnosti simulácie), pričom pre ostatné časti modelu bola definovaná veľkosť prvku 2 mm.



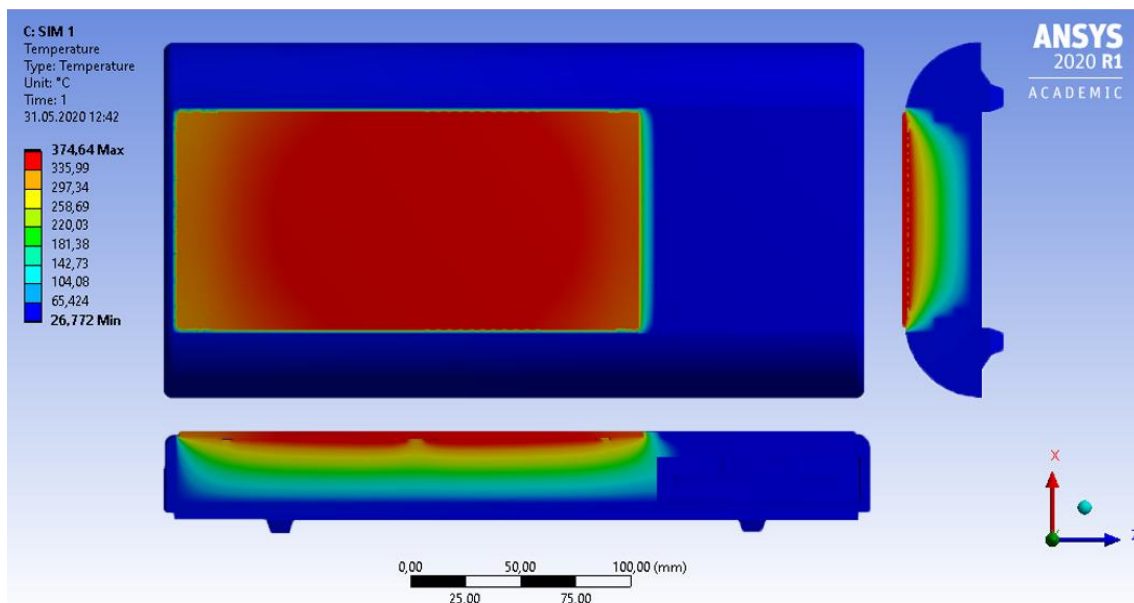
Obr. 51 Zobrazená sieť simulovaného modelu

V simulačnom programe boli skontrolované všetky dostupné spojenia (contacts) medzi jednotlivými časťami modelu, a potom v časti Steady-State Thermal Analysis boli pomocou tlačidla INSERT pridané požadované parametre simulácie. Na topné telesá (telá motívu) bola pridaná okrajová podmienka Internal Heat Generation, ktorá určuje pomer výkonu telesa na objem a jej hodnota bola zvolená vzhľadom k požadovanému výkonu a danej ploche topných telies. Parameter Perfectly Insulated, ktorý definuje odizolovanie časti modelu bol nastavený na bočné a spodné steny keramických substrátov a na nich natlačených motívoch, prípadne pri druhej názornej simulácii v kapitole 4.2 bol tento parameter pridaný aj na okolie dištančných stĺpikov hornej platne. Posledným nastavením bola podmienka Convection, kedy bola nastavená prirodzená konvekcia prúdenia vzduchu na všetky vonkajšie steny simulovaného modelu. Nakoniec boli do výsledkov pridané požadované grafy a bola spustená simulácia, ktorá pre zložitosť nastavení, veľkého množstva prvkov a uzlov generovanej siete modelu trvala relatívne dlhý čas. Výsledky realizovaných simulácií sú zobrazené a popísané v nasledujúcich podkapitolách.

4.1 Simulácia prestupu tepla pri položenej hornej platni

V prípade prvej simulácie bola realizovaná teplotná simulácia prestupu tepla zariadenia, pričom horná platňa z hliníka je položená a oddelená od zvyšku tela pomocou izolácie. Na obrázku Obr. 52 možno vidieť výsledok tejto simulácie, kde je viditeľné rovnomerné rozloženie tepla na povrchu časti s topnými telesami a na príslušných rezoch je názorne zobrazené rozloženie tepla vo vnútri zariadenia. V týchto miestach sa teplota pohybuje v rozsahu od 350 do 375 °C, pričom v majoritných miestach vyhrievacej plochy je odchýlka teplôt 10 °C, čo je v zhode so stanovenými požiadavkami. Telo zariadenia sa vďaka použitej izolácie zahrieva minimálne a dosahuje teplotu 40–45 °C v závislosti od vzdialenosti od topných telies. Pri oddelení hornej platne bola použitá izolácia s určitou hrúbkou, ktorá zaistila odizolovanie riadiacej časti od vyhrievacej plochy a teplota dosahuje približne 25–30 °C,

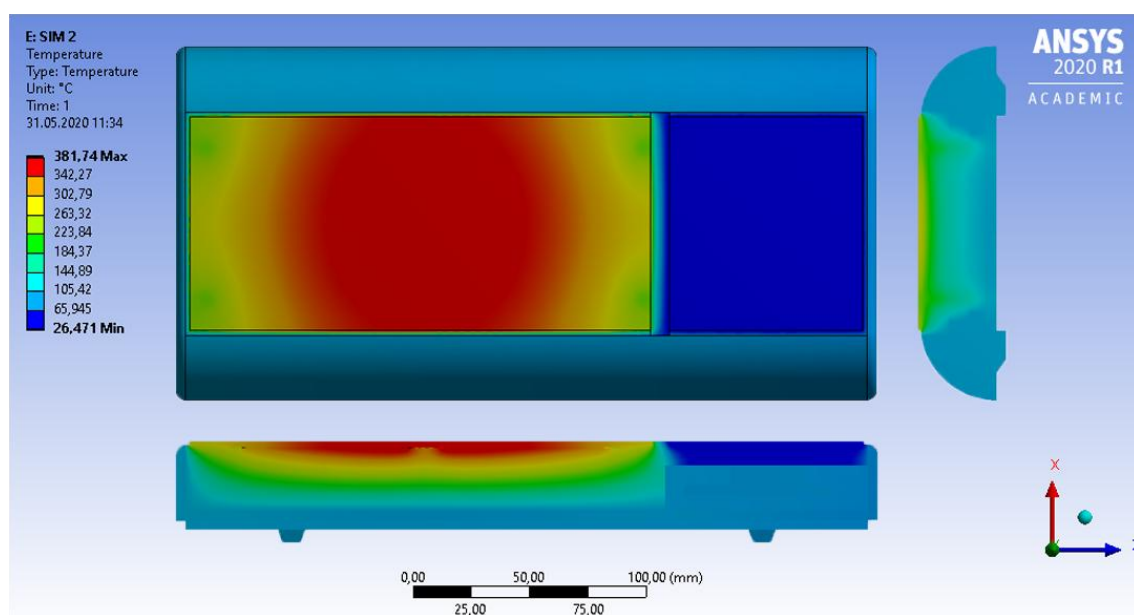
čo je rovnako výhodné z hľadiska použitých elektronických komponentov, ktoré môžu byť náchylnejšie na dlhodobu vyššiu teplotu a zahrievanie.



Obr. 52 Rozloženie tepla na výslednom zariadení bez dištančných stĺpikov

4.2 Simulácia prestupu tepla pri uchytenej hornej platni dištančnými stĺpikmi

Na rozdiel od prvej simulácie v kapitole 4.1, boli pri tejto teplotnej simulácii do modelu pridané ďalšie prvky v podobe dištančných stĺpikov. Dištančné stĺpiky tvoria spojenie hornej vyhrievacej časti s telom zariadenia, a keďže v tomto prípade boli použité skrutky pre spojenie týchto častí, ide o vodivé spojenie medzi jednotlivými časťami. Pri tejto simulácii dochádza k odvodu tepla prostredníctvom týchto prvkov, čo možno vidieť aj na výsledku tejto simulácie s vnútornými rezmi na obrázku Obr. 53.

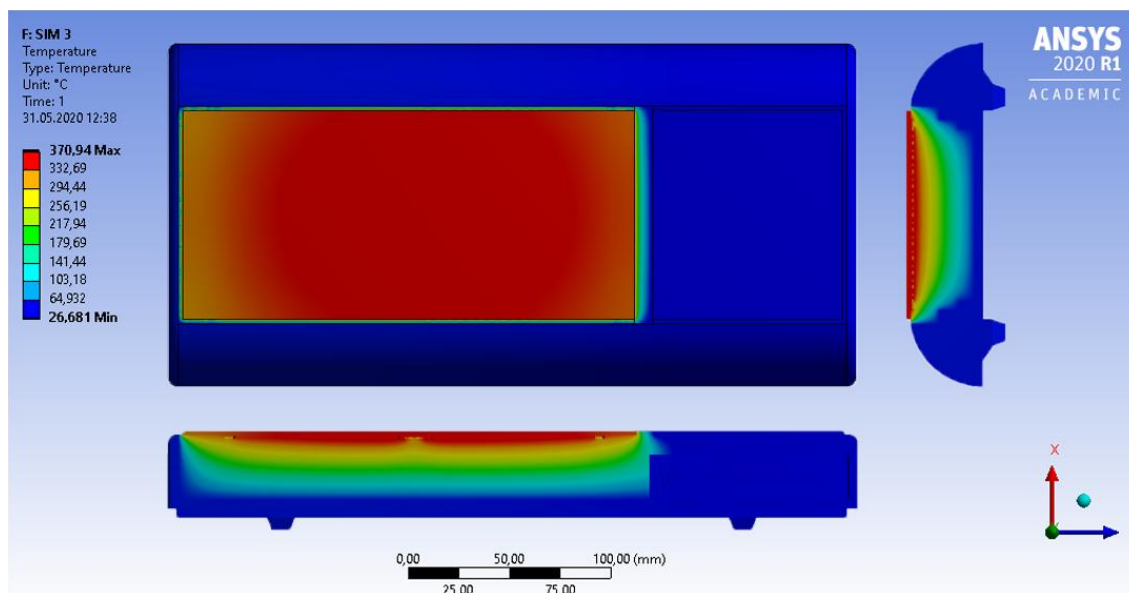


Obr. 53 Rozloženie tepla na tele zariadenia s dištančnými stĺpikmi pripevnenými skrutkami

Zo získaných výsledkov možno vidieť výrazný odvod tepla, ktorý je zreteľný najmä na okrajoch vyhrievacej časti zariadenia. To je spôsobené predovšetkým dištančnými stĺpikmi, ktoré tvoria bez použitia určitého druhu izolácie vodivé spojenie a spôsobujú odvod tepla z hlavnej topnej časti, čím dochádza k zvýšeniu teploty aj na okolitých prvkoch, resp. tele zariadenia. Pri sledovaní teploty možno poznamenať výraznejšie odchýlky na topnej časti, kedy v strede topných telies je teplota najvyššia a pohybuje sa v rozsahu 360–375 °C. Naopak smerom ku krajom topných telies sa teplota výraznejšie znižuje postupne od 360 °C až na 305 °C a teplota na dištančných stĺpikoch, ktoré najviac odvedú teplo je približne 235 °C. Práve týmto odvodom tepla dochádza k ohrevu tela hot plate, kde možno vidieť teplotu 85 až 95 °C, pričom dôjde aj k zvýšeniu teploty na oddelenej riadiacej časti hornej platne na 35 °C. Pri tejto simulácii boli zistené väčšie odchýlky najmä na povrchu vyhrievacej časti, čo je pre využitie hot plate nevyhovujúce a rovnako dochádza aj k zvýšenému ohrevu tela konštrukcie, čo nie je ideálnym a žiaducim prípadom.

4.3 Simulácia prestupu tepla pri uchytenej hornej platni odizolovanej od dištančných stĺpikov

V poslednej realizovanej simulácii boli k dištančným stĺpikom pridané vrstvy tepelne izolačného lepidla s hrúbkou 2 mm, čím bol simulovaný reálny uvažovaný spôsob spojenia hornej vyhrievacej platne s ostatným telom zariadenia. Po nastavení všetkých parametrov simulácie a spustení simulácie boli dosiahnuté výsledky podobné ako v prvom prípade v kapitole 4.1 s mierne odlišným rozložením tepla. Výsledok simulácie možno vidieť na nasledujúcom obrázku Obr. 54, kde sú názorne zobrazené aj vnútorné rezy zariadenia s rozložením tepla.



Obr. 54 Rozloženie tepla na zariadení so všetkými uvažovanými prvkami

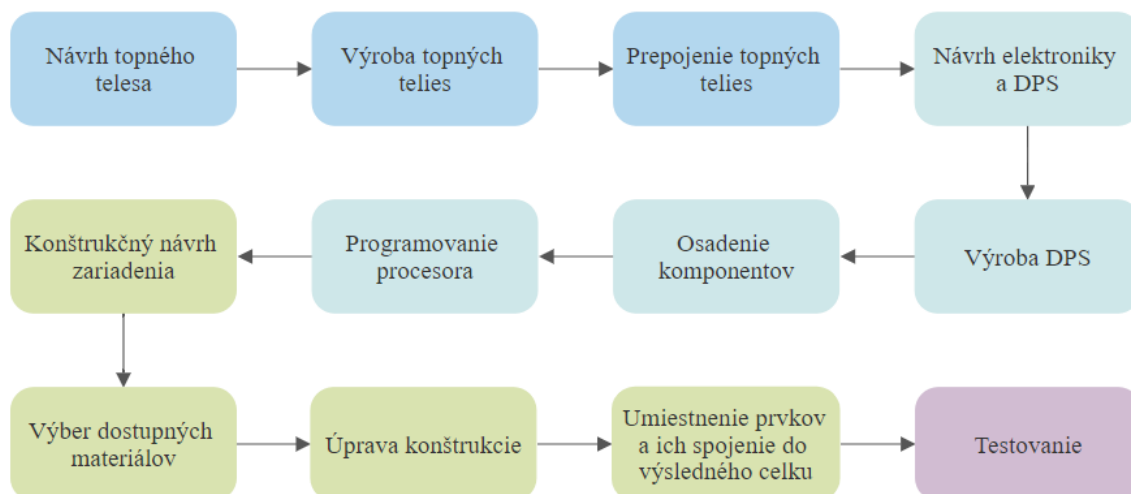
Z pozorovania výsledkov simulácie boli zistené teploty na povrchu vyhrievacej časti v rozsahu 345–370 °C, pričom telo zariadenie sa zahrievalo mierne viac ako pri prvej simulácii, kedy bola teplota 45–50 °C a oddelená riadiaca časť dosahovala

teplôt približne 30 °C. Z danej simulácie možno poznamenať, že vrstva tepelne izolačného lepidla s dostatočnou žiaruvzdornosťou vzhľadom k teplote vyhrievacej plochy dokáže odizolovať ostatné časti od výraznejšie rozohriatých topných elementov. Výsledky sú podobné s výsledkami prvej simulácie, kedy bol model zjednodušený o použité dištančné stĺpiky.

Výsledky simulácii získané zo samostatných motívov na keramických substrátoch sa mierne líšili od výsledkov simulácie celkového zariadenia, čo bolo spôsobené odlišným zadávaním okrajových podmienok (podmienky pri motívoch boli zadávané najmä pre názornosť a predstavu, aké bude rozloženie tepla generovaného daným motívom vytvoreným technológiou hrubých vrstiev a prvotná uvažovaná teplota bola 450 °C), no predovšetkým rozloženie tepla na povrchu je ovplyvnené hornou platňou, ktorá je z hliníka, a tým pádom možno vidieť iné vyrovnávanie teploty na danom povrchu, ako keď bol motív pozorovaný iba zo strany keramických substrátov. V tomto prípade dochádza pomocou tenkej platne hliníka (vyššia tepelná vodivosť kovu ako keramického substrátu) k postupnému rovnomernému rozloženiu tepla na povrchu vyhrievacej časti zariadenia, čo je očakávaný jav. Ideálne rovnomerné rozloženie tepla na povrchu vyhrievacej časti v porovnaní s pokusom na optimalizovanom motíve je dané ideálne rovnakou hrúbkou motívu vo všetkých miestach keramického substrátu. Simulácie boli nastavované tak, aby teplota na povrchu vyhrievacej plochy dosahovala maximálnu zaznamenanú teplotu pomocou pokusu s termokamerou, čiže pre teplotu pri ktorej bude zariadenie pracovať bez rizika poškodenia topných prvkov (teplota približne 370 °C).

5 ZOSTAVENIE ZARIADENIA

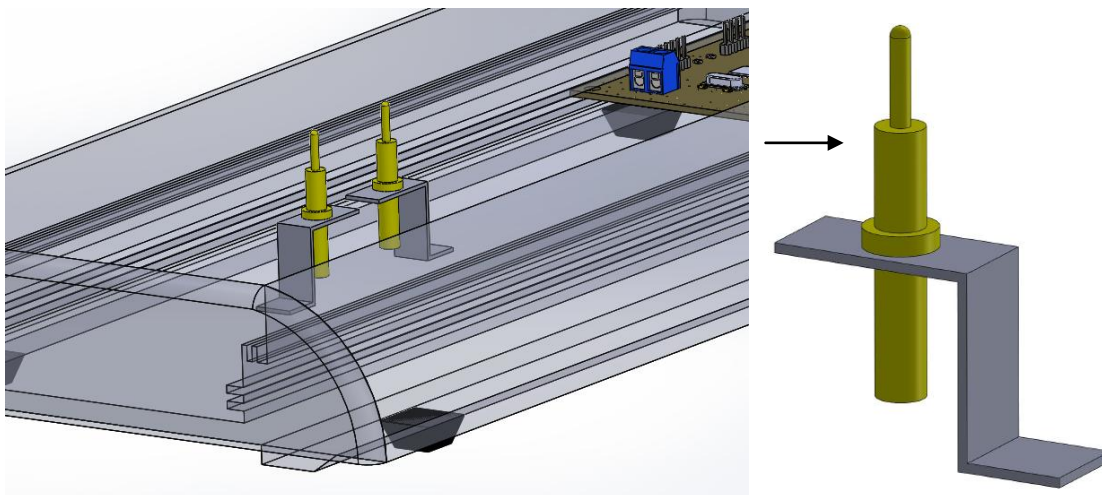
V tejto kapitole diplomovej práce bude popísaný nami navrhnutý a realizovaný výrobný postup pomocou stručného rozboru jednotlivých fáz výroby výsledného zariadenia hot plate. Na nasledujúcom obrázku Obr. 55 možno vidieť zjednodušený schematický diagram výrobného postupu. Tieto fáze finálneho zostavenia zariadenia uvedené na danom diagrame sú rozdelené do jednotlivých podkapitol.



Obr. 55 Zobrazenie výrobného postupu finálneho zariadenia

5.1 Topné telesá

V prvej fáze realizácie hot plate bolo potrebné vyrobiť topné teleso s vhodným motívom, čo pozostávalo z návrhu motívu a následnej výroby filmovej predlohy, pomocou ktorej bolo možné na očistené polyesterové sito preniesť požadovaný motív. Ďalej bolo nutné zosúhlasiť vytvorenú šablónu s daným motívom a sieťotlačového poloautomatu, kedy už bolo možné natlačiť na sieťotlač motív na keramický substrát definovaných rozmerov. Po odstáti (levellingu) substrátov nasledovalo ich sušenie v sušičke po definovanú dobu pri určitej teplote. Nakoniec boli keramické substráty položené na dopravník priebežnej vypaľovacej pece a pri nastavenom teplotnom profile odpovedajúcom danej hrubovrstvej paste bol realizovaný výpal. Podrobný technologický postup výroby motívu, sieťotlače a ostatných krokov je popísaný v kapitole 3. Potom bolo potrebné skontrolovať odpor daných motívov a pomocou termokamery skontrolovať rozloženie tepla na povrchu vyrobených topných elementov, ktoré bolo následne možné použiť do navrhovaného zariadenia. Po výrobe optimalizovaného topného elementu bolo vyriešené vzájomné prepojenie dvoch topných telies a ich prepojenie s elektronickou časťou zariadenia. Uvažované prepojenie bolo vyriešené pomocou pružinových vývodov s ich následným vhodným upevnením v konštrukcii.



Obr. 56 Upevnenie pružinových kontaktov

Navrhované riešenie upevnenia pružinových kontaktov v tele konštrukcie je znázornené na obrázku Obr. 56. Dané riešenie pozostáva z využitia hliníkového plechu upraveného do tvaru L, ktorý bude pripevnený na spodnú časť konštrukcie tepelne izolačným lepidlom a následne naň bude tvrdým spájkovaním prichytený pružinový kontakt, ktorý bude zabezpečovať vodivú cestu medzi substrátmi a elektronickou časťou. Bolo by možné použiť tepelne izolačné lepidlo od firmy P-D Refractories s označením Rudokit odolné až do teploty 1350 °C. Alternatívnym riešením vzájomného prepojenia topných elementov a elektroniky by bolo využitie bodového zvarovania. Táto fáza výrobného postupu je znázornená na predchádzajúcom diagrame pomocou útvarov bledomodrej farby.

5.2 Elektronická časť a DPS

V ďalšej časti bolo potrebné zaoberať sa elektronickou časťou zariadenia. Najdôležitejšie pri návrhu bolo nutné rešpektovať funkcie systému pomocou sieťového napájania, od ktorého sa následne odvíjal schematický návrh, a aj návrh DPS. V prvom kroku bol realizovaný návrh obvodu elektroniky v dostupnej verzii programu EAGLE 9.5.2, kde boli rešpektované uvažované rozmery konštrukcie a následne podľa nich bola navrhnutá DPS, ktorá bude zaisťovať správnu činnosť systému regulácie a napájania. Popis schematického návrhu a návrhu dosky plošného spoja je detailne zobrazený v kapitole 2.5. Nasledovalo získanie výrobných dát z návrhového softvéru potrebných pre výrobu DPS, ktorá bola realizovaná na objednávku firmou Gatema a.s. Z výstupného súboru bol vygenerovaný zoznam potrebných súčiastok (partlist), na základe ktorého bola vystavená objednávka všetkých súčiastok a komponentov od dodávateľa Mouser Electronics, resp. GM Electronics. Po doručení objednaných súčiastok bolo možné realizovať osadenie jednotlivých súčiastok na vyrobenú DPS, kedy osadenie prebiehalo ručným spájkovaním pomocou bezolovnatej pájky. Po optickej kontrole osadenej DPS je možné prejsť k poslednému kroku tejto časti – programovanie procesora, ktorý bude zabezpečovať reguláciu teploty topných telies a samotnú činnosť výsledného systému. Programovanie prebiehalo pomocou vyvedeného ICSP konektoru vo vývojovom prostredí komerčne predávaných

vývojových dosiek Arduino. Táto časť popisovaného výrobného postupu je na popisovanom diagrame na obrázku Obr. 55 zobrazená bledozelenou farbou.

5.3 Konštrukcia

Nasledujúca časť výrobného postupu sa zaoberá konštrukciou zariadenia hot plate. Najskôr bol navrhnutý model konštrukcie zariadenia v programe SOLIDWORKS 2016, ktorý pozostával z jednotlivých vytvorených komponentov. Popritom bol vytvorený aj zjednodušený model vhodný pre teplotné simulácie celého navrhnutého zariadenia. Prehľadný a detailný popis jednotlivých častí zariadenia, kompletne zariadenie a okótované rozmery sú charakterizované v kapitole 2.4. Ďalej nasledovalo zhrnutie všetkých požadovaných parametrov a následný výber dostupných a vhodných materiálov pre navrhnuté zariadenie hot plate. Bolo potrebné realizovať výber nosnej konštrukcie, v ktorej budú umiestnené všetky ostatné súčasti zariadenia. Po výbere duralového profilu bolo nutné do požadovaných rozmerov rozmiestniť jednotlivé prvky, z dôvodu dostatočnej predstavy o výslednom riešení. Potom boli získané vhodné materiály na vrchnú platňu hot plate – hliníkový plech, na ktorú budú zo spodnej strany pripevnené topné telesá. Po odmeraní a naznačení skutočných rozmerov danej plochy, bolo možné odrezat' tieto rozmery vrchnej platne, pričom boli získané aj bočné hrany, ktoré by sa do požadovaného tvaru oblúku obrúsili. Na bočných hranách boli následne vyrezané otvory pre vsadenie sieťového kábla a vypínača. Vrchnú platňu bolo nutné rozdeliť na dve časti, keďže jedna časť, na ktorej sú topné telesá musela byť oddelená, čiže odizolovaná od druhej časti, kde sa nachádzajú ovládací prvok a displej. Tiež do tejto druhej časti bolo potrebné vyrezať otvory na vedenie prepojovacích káblov z elektroniky do otočného enkodéru a zobrazovacieho displeja. Posledným dôležitým materiálom bola izolácia, ktorá bola poskytnutá od kolegov z fakulty FAST VUT. Ide o vysokoteplotnú izoláciu Fiberfrax Durablanket S z keramických vlákien, ktorá má hrúbku 25 mm, kedy po stanovení potrebných rozmerov bola odrezaná požadovaná dĺžka a šírka izolácie, ktorá mohla byť následne vsadená do nosnej konštrukcie. Poslednými prvkami boli držiace stĺpiky, ktorých úlohou bolo uchytiť vrchnú platňu do nosnej konštrukcie. Tieto dištančné stĺpiky boli pomocou tepelne izolačného lepidla upevnené do spodnej časti nosnej konštrukcie a do spodnej časti vrchnej platne. V záverečnej fáze tejto časti po získaní a upravení všetkých súčastí celku do požadovaných rozmerov a tvarov bolo možné prejsť k finálnemu spojeniu jednotlivých častí do výsledného zariadenia. Do drážky duralového profilu (nosnej konštrukcie) bude vložená navrhnutá a naprogramovaná DPS riadiacej elektroniky, na vyznačených miestach pripevnené držiace stĺpiky k nosnej konštrukcii, na vrchnú platňu budú tepelne vodivým lepidlom upevnené dva keramické substráty (topné telesá), pripevnenie bočných hliníkových strán k nosnej konštrukcii a prepojenie riadiacich prvkov s elektronikou, na záver uchytenie vrchnej platne s nosnou konštrukciou a prilepenie spodných konštrukčných nožičiek zariadenia. Oddelenú hornú konštrukciu bude potrebné spojiť spolu s konštrukciou so zemou, aby boli splnené požiadavky definované príslušnými technickými normami zariadení tohto typu. Všetky

tieto čiastkové popisované kroky sú znázornené v prehľadnom diagrame na predchádzajúcom obrázku Obr. 55, pričom sú rozlíšené svetlozelenou farbou.

5.4 Fáza testovania

V záverečnej časti testovania by sa vyhodnocovalo skutočné rozloženie tepla na povrchu topnej časti hot plate, rýchlosť zmeny teploty, presnosť nastavenej teploty a podobne. Pomocou výsledného rozloženia teploty by sa takisto stanovili maximálne prevádzkové podmienky, pre vyhodnotenie by bolo možné použiť dostupnú termokameru, podobne ako v prípade testovania navrhnutých testovacích motívov a optimalizovaného motívu topného telesa.

Nakoniec tejto kapitoly bol realizovaný odhad ceny kompletného zariadenia pomocou zistených cien jednotlivých komponentov a súčiastok. Niektoré z materiálov boli získané od rôznych firiem, ktoré by dané súčasti nevyužili a skončili by v odpade, z toho dôvodu je odhadovaná cena zapísaná ako 0 Kč. Rozpísaný odhad cien jednotlivých komponentov je uvedený v prílohe C.5 v tabuľke 8. Podľa tejto tabuľky, kde je súpis všetkých použitých komponentov a materiálov na hot plate, bola určená odhadovaná cena finálneho zariadenia hot plate na približne 3500 až 4000 Kč.

6 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo na základe spracovanej práce a poznatkov získaných aj v semestrálnej práci vypracovať kompletný návrh zariadenia topnej dosky, ďalej bolo potrebné optimalizovať navrhnutý motív, ktorý by bol následne simulovaný pre prenos tepla na povrchu substrátu a nakoniec realizovať simuláciu celého zariadenia s vyhodnotením získaných výsledkov.

V teoretickej časti práce bola popísaná problematika súvisiaca s topnými doskami a oblasť hrubovrstvej technológie, ktorá bola neskôr použitá v návrhovej časti práce a pre samotnú výrobu topných telies. V tejto časti textu boli tiež rozobraté používané typy regulácii, z ktorých bola uvažovaná na regulovanie výslednej topnej dosky PID regulácia.

Druhý celok práce možno pomenovať ako praktickú časť, kde bol realizovaný návrh a výroba topných telies a ich zjednodušené simulácie, kompletný návrh konštrukcie zariadenia a voľba materiálov, návrh obvodu a DPS elektronickej časti a testovanie so záverečnými simuláciami prestupu tepla v celom zariadení.

Návrh a následná výroba topných prvkov pozostávali z niekoľkých krokov, kedy najskôr bol vytvorený návrh motívov, nasledovalo prenesenie motívu na sito a sieťotlač. Ako substrát bola zvolená korundová keramika, ktorá dokáže odolávať vysokým teplotám, ktoré budú v tejto oblasti dosahované. Po odstátí natlačených motívov na substráty, boli tieto vysušené a následne vypálené v priebežnej vypaľovacej peci s definovaným teplotným profilom. Potom mohli prebehnúť jednotlivé merania a pokusy s topnými telesami. Z navrhnutých testovacích motívov bola zvolená druhá možnosť s odporovým motívom meandrového typu s vypočítaným odporom $R_2 = 63,72 \, \Omega$, ktorý bol realizovaný v semestrálnej práci. V ďalších krokoch sa uskutočnili merania odporu získaného na danom substráte. Najskôr bol zmeraný odpor príliš vysoký ($R_{MT0} = 350 \, \Omega$), čiže bola potrebná oprava motívu, pretože vypálená vrstva bola príliš tenká ($10 \, \mu\text{m}$). V ďalšej fáze bola zmeraná hrúbka väčšia ako $30 \, \mu\text{m}$, čiže aj odpor klesol na nižšiu hodnotu ($R_{MT1} = 31,48 \, \Omega$) ako bola vypočítaná. V tomto prípade bol dosiahnutý odpor vhodný k ďalšiemu testovaniu. Pri realizovanej oprave bol zistený problém nerovnomerne nanesej a následne vypálenej odporovej vrstvy daného motívu, čo znamenalo v poslednej fáze testovania nerovnomerné rozloženie tepla na povrchu keramického substrátu. Pri testovaní tak bola dosiahnutá maximálna teplota na substráte približne $350 \, ^\circ\text{C}$, prudký nárast teploty a dlhšiu dobu nerovnomerné rozloženie tepla znamenalo poškodenie keramického substrátu, čo je detailne popísané v kapitole 3.4. Predovšetkým z dôvodu nerovnomerne rozloženého tepla na testovacom substráte bol v diplomovej práci navrhnutý optimalizovaný motív, ktorý bol vyrobený z vodivej pasty. Zmeraný odpor tohto motívu $R_{\text{MOPT}} = 97,2 \, \Omega$ sa líšil od teoretickej hodnoty z rovnakého dôvodu ako pri testovacom motíve – vyššia hrúbka vypálenej vrstvy motívu, no pre ďalšie testovanie bol vhodný. Testovanie daného motívu je podrobne popísané v kapitole 3.6, kedy bolo v závere použité sieťové (striedavé) napätie, pomocou ktorého by malo byť napájané aj reálne zariadenie. Teplota sledovaná pomocou dostupnej termokamery bola rovnomerne rozložená po celom povrchu, pričom maximálna teplota bola obmedzená rozsahom

termokamery, ktorá ukazovala hodnotu vyššiu ako 370 °C. Topný element napájaný dlhšiu dobu vysokým napätím nevykazoval žiadne známky poškodenia a plnil stabilne svoju úlohu. V závere experimentu bolo pomocou autotransformátora zvýšené napätie na maximálnu hodnotu, a vtedy bol po krátkej dobe topný prvok poškodený. Týmto experimentom bol overený očakávaný jav, že použitý keramický substrát z korundovej keramiky má obmedzené mechanické vlastnosti pri vysokom tepelnom strese, čiže pri daných podmienkach došlo k jeho deštrukcii. Týmto boli stanovené aj maximálne prevádzkové podmienky, pri ktorých bude zariadenie spoľahlivo fungovať a nebude spôsobené jeho poškodenie.

Všetky navrhnuté motívy boli odsimulované pomocou simulačného programu ANSYS Workbench 2020 R1, pričom výsledky simulácii slúžili iba pre orientáciu rozloženia tepla na danom motíve a následne aj pre vhodný návrh optimalizovaného motívu. Podľa získaných simulácii možno vidieť zlepšenie rozloženia tepla na optimalizovanom motíve vzhľadom k ostatným dvom testovacím motívom. V porovnaní s testovacím motívom meandrového typu znamenalo zlepšenie väčšiu rovnomernosť rozloženia teploty po celom substráte, pričom výraznejší rozdiel teplôt bol iba na okrajoch substrátu, navyše pri porovnaní s teplotnou simuláciou prvého testovacieho motívu bola dosiahnutá výrazná úspora materiálu so zachovaním rozloženia teploty po celej ploche substrátu (rozdiel teplôt 1 až 2 °C).

V časti návrhu konštrukcie bol vypracovaný a popísaný celkový návrh zariadenia topnej dosky, kde kapitola 2.4 obsahuje podrobný popis uvažovaných materiálov, typ spojenia do jedného celku, pohľad zhora so zobrazenými rozmermi tela hot plate, bočný rez zobrazujúci čo všetko tvorí vnútornú časť zariadenia a názorné rozloženie všetkých súčastí zariadenia. Táto časť práce je ďalej sprevádzaná návrhom obvodu elektronickej časti zariadenia a dosky plošného spoja, a finálnym výberom jednotlivých materiálov uvažovaných a použitých pri výrobe hot plate.

Nakoniec bol vytvorený zjednodušený model zariadenia vhodný pre simulácie prestupu tepla. Boli simulované tri prípady simulácie celého zariadenia – upevnená horná platňa na vnútornej izolácii, upevnenie hornej platne pomocou skrutkami pripevnených dištančných stĺpikov a odizolovaných dištančných stĺpikov. Podľa uvažovanej konštrukcie, kedy boli postupne pridávané jednotlivé prvky do modelu, ktorý sa tým stával zložitejším, bol súhlasný model pri treťom type simulácie s použitím tepelne izolačného lepidla, ktoré odizolovalo dištančné stĺpiky. Pri porovnaní výsledkov simulácii samostatných motívov možno pozorovať mierne odchýlky od simulácii celého zariadenia z dôvodu zjednodušených simulácii motívov, ktoré slúžili iba pre orientáciu a vhodný návrh optimalizovaného motívu. V prípade simulácii celkovej topnej dosky je rozloženie tepla na povrchu vyhrievacej časti ovplyvnené najmä hornou hliníkovou platňou, ktorá predstavuje iné vyrovnávanie teploty na danom povrchu (má vyššiu tepelnú vodivosť), ako keď boli pozorované motívy na keramickom substráte. Pri týchto simuláciách dochádza k rovnomernejšiemu rozloženiu tepla s odchýlkami ± 15 °C, ktoré prispievajú k reálnejšiemu pohľadu na dané zariadenie práve z dôvodu definovania všetkých materiálov, z ktorých by malo pozostávať. Rovnomerné rozloženie tepla na povrchu topnej dosky je dané ideálne rovnakou hrúbkou motívu vo všetkých miestach, zatiaľ čo pri reálne vyrobenom motíve pri definovaných

podmienkach mohli vzniknúť mierne nerovnosti daného motívu, prípadne sa môžu objaviť rôzne nehomogenity keramického substrátu.

V poslednej časti textu sú zhrnuté a stručne popísané všetky kroky výrobného postupu finálneho zariadenia so záverečným stanovením odhadu ceny vyrobeného zariadenia. Odhadovaná cena podľa rozpisu všetkých súčasti zariadenia podľa tabuľky 8 v prílohe C.5 dosiahla hodnotu približne 3500 Kč.

Pre budúcu realizáciu reálneho zariadenia je potrebné realizovať programovú časť elektronického systému regulácie a upraviť a spojiť jednotlivé materiály do finálneho výrobku. Všetky materiály a komponenty sú pripravené, no z dôvodu neočakávanej udalosti a dlhej nemožnosti práce priamo v laboratóriu nemohli byť spracované do reálneho navrhnutého zariadenia hot plate.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] VOLF, I.; JAREŠOVÁ, M.; OUHRABKA, M. *Přenos tepla*. [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>.
- [2] KOBERLAIN, B. *Why Einstein will never be wrong*. [online]. [2014-01-14]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2014-01-einstein-wrong.html>.
- [3] ZVERKA, M. *Prenos Tepla – TERMOKINETIKA – diel 1*. [online]. [2005-09-02]. Dostupné z: http://www.stubadivers.sk/teoria/prenos_tepla/prenos_tepla_01_05.htm.
- [4] POKORNÝ, M. *Sálání tepla*. [online]. [2006-11-10]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-4_Salani_tepla.pdf.
- [5] TKOTZ, Klaus et al. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. doplněné vyd. Praha: Europa – Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-13-3.
- [6] BUJALOBOKOVÁ, M. a TRNKA, P. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích*. [online]. 2008 [cit. 2019-12-10] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>.
- [7] ADÁMEK, M. *Obecně o technologii tlustých vrstev*. [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_2.htm.
- [8] *Thick film hybrid circuits*. [online]. [2014-01-15]. Dostupné z: <https://www.aurel.it/en/electronic-manufacturing-services-ems/thick-film-hybrid-circuits>.
- [9] STANĚK, J. *Hybridní integrované obvody*. [online]. 2004 [cit. 2019-12-10] Dostupné z: http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol_III-1tlus_a_tenk.pdf.
- [10] SZENDIUCH, I. *TLUSTÉ VRSTVY (Thick Films) (2)*. [online]. 2012 [cit. 2019-12-10] Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tluste%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tluste%20vrstvy(Bc).pdf).
- [11] SZENDIUCH, I. *Tlusté vrstvy*. [online]. 2009 [cit. 2019-12-10] Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf.
- [12] SZENDIUCH, I. *Laboratorní cvičení – realizace hybridního integrovaného obvodu*. [online]. [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/190407/mod_resource/content/1/LC1_navod.pdf.
- [13] ADÁMEK, M. *Technologie výroby a používané materiály*. [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_2_2.htm.
- [14] *Substrates*. [online]. [2016-06-30]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/substrates>.
- [15] *BK7 – glass substrates*. [online]. [2013-10-03]. Dostupné z: <https://www.mtixtl.com/BK7-Glass-101005S260/40.aspx>.
- [16] *LTCC Materials*. [online]. [2019-01-27]. Dostupné z: [https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/thick_film_materials/ltcc_m aterials/ltcc_materials_page.html](https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/thick_film_materials/ltcc_materials/ltcc_materials_page.html).

- [17] *Thick-film technology with aluminum substrates optimizes LED assembly*. [online]. [2011-07-18]. Dostupné z: <https://www.ledsmagazine.com/manufacturing-services-testing/research-development/article/16697598/thickfilm-technology-with-aluminum-substrates-optimizes-led-assembly-magazine>.
- [18] 5 – *Thick-film technology*. [online]. [2017-11-09]. Dostupné z: http://www.ett.bme.hu/meca/Courses/TEP/5_1.html.
- [19] *Liquid MIDI*. [online]. [2015-07-20]. Dostupné z: <https://www.designboom.com/technology/ejtech-liquid-midi-07-20-2015>.
- [20] SZENDIUCH, I. a HEJÁTKOVÁ E. *Mikroelektronika a technologie součástek – úvod do elektronického hardware (BMTS)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013.
- [21] SEMACH. *Aplikační technologie*. [online]. 2008 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: http://www.semach.cz/pdf/popis_smt.pdf.
- [22] ADÁMEK, M.; HEJÁTKOVÁ, E.; NOVOTNÝ, M.; PRÁŠEK, J.; VAŠKO, C. *Moderní technologie elektronických obvodů a systémů: Laboratorní cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.
- [23] *Technologie tlustých vrstev*. [online]. 2014 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/30852668/technologie-tenkaa-1-2-ch-vrstev-umel>.
- [24] *Hot plate*. [online]. [2019-10-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_plate.
- [25] *EVG®105 Bake Module*. [online]. [2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.evgroup.com/products/lithography/resist-processing-systems/evg105>.
- [26] *GF-DL-HT Dual Hot Plate*. [online]. [2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.pcbunlimited.com/products/gf-dl-ht-dual-hot-plate>.
- [27] PRUDENZIATI, M. a HORMADALY, J. *Printed films: Material science and applications in sensors, electronics and photonics*. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 0857096214.
- [28] DESHMUKH, Y.V. *Industrial heating: principles, techniques, materials, applications, and design*. CRC Press, 2005. s. 383–393. ISBN 978-0-8493-3405-4.
- [29] *Thick film heater printed on a metal substrate*. [online]. [2013-12-04]. Dostupné z: <https://dateccoating.com/integral-thick-film-aluminum-based-heater>.
- [30] *A thick film heater printed on a mica sheet*. [online]. [2019-08-02]. Dostupné z: <https://dateccoating.com/mica-tf-thick-film-mica-based-heater>.
- [31] *KAPTON® Flexible heating element*. [online]. [2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.mcexpocomfort.it/en/Exhibitor-Online-Directory/Exhibitors/Company-Content/?coId=349301>.
- [32] OMELKA, V. *Návrh regulátorů pro regulované soustavy s velkými časovými konstantami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Davidová, Ph.D.
- [33] VODA, Z. *Rychlé seznámení s PID regulátorem*. [online]. [2019-03-12]. Dostupné z: <https://arduino.cz/rychle-seznameni-s-pid-regulátorem>.

- [34] Omega Technologies, Inc. *Basic Design Overview*. [online]. Ver 1.9, 2016 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: https://ohmega.com/wp-content/uploads/F-4-Overview-Design-Guide_u06282016.pdf.
- [35] Atmel Corporation. *ATmega48PA/88PA/168PA/328P* [online]. Ver 1, rev. 8161C – 05/09, 2009 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.mouser.com/pdfdocs/Gravitech_ATMEGA328_datasheet.pdf.
- [36] Arduino Project Hub. *How to Use a Rotary Encoder* [online]. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://create.arduino.cc/projecthub/MisterBotBreak/how-to-use-a-rotary-encoder-16e079>.
- [37] GM electronic, spol. s.r.o. *OLED displej 0,96 palce* [online]. Ver 1, 2017 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.gme.sk/data/attachments/dsh.772-153.1.pdf>.
- [38] HENRY'S BENCH. *MAX6675 Temp Module Arduino Manual and Tutorial* [online]. 2015 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-temperature-measurements/max6675-temp-module-arduino-manual-and-tutorial>.
- [39] Texas Instruments. *LM340, LM340A and LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators* [online]. Ver 03, rev. L 2016, 2000 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf>.
- [40] VOJÁČEK, A. *Jak si (ne)zničit relé* [online]. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupný z: <https://automatizace.hw.cz/jak-si-neznicit-rele.html>.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

Q	Označenie fyzikálnej veličiny tepla
J	Joule – označenie fyzikálnej jednotky tepla
c	Merná tepelná kapacita telesa
T	Termodynamická teplota
λ	Merná tepelná vodivosť materiálu
σ	Stefan-Boltzmannova konštanta
HIC	Hybrid Integrated Circuit
HIO	Hybridný Integrovaný Obvod
Ω/\square	Ohm na štvorec – vyjadrenie odporu pasty pre hrubovrstvú technológiu
TCR	Teplotný koeficient odporu
VCR	Napäťový koeficient odporu
D	Deborino číslo
t_{rel}	Relaxačná doba materiálu
t_{obs}	Doba pozorovania
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramic – nízkoteplotne vypaľovateľná keramika
x_{min}	Kritický minimálny rozmer vodiča
NTC	Negatívny teplotný koeficient odporu
PTC	Pozitívny teplotný koeficient odporu
PI	Proporcionálne integračný regulátor
PD	Proporcionálne derivačný regulátor
PID	Proporcionálne integračný derivačný regulátor
R_X	Výsledná hodnota jednotlivých vypočítaných alebo zmeraných odporov
R_{\square}	Vrstvový odpor odporovej pasty na štvorec
ρ_{\square}	Vrstvová rezistivita vodivej pasty na štvorec
l	Dĺžka odporového alebo vodivého motívu
w	Šírka odporového alebo vodivého motívu
A	Počet štvorcov odporového alebo vodivého motívu
ESL	Electro-Science Laboratories – výrobca použitej odporovej pasty
OLED	Organická svetlo-emitujúca dióda – typ displeja
DPS	Doska plošných spojov

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Využitie technológie hrubých vrstiev [8].....	12
Obr. 2 Technologický postup hrubovrstvej technológie [10]	13
Obr. 3 Závislosť deformácie na mechanickom napätí [10].....	17
Obr. 4 Príklady používaných substrátov [14] [15] [16] [17] [18] [19]	18
Obr. 5 Princíp nanášania pasty sieťotlačou [20]	19
Obr. 6 Faktory, ktoré majú vplyv na priebeh sieťotlače [10].....	20
Obr. 7 Znázornenie rôznych prevedení šablón sieťotlače [20]	20
Obr. 8 Princíp šablónovej tlače [10]	21
Obr. 9 Priebeh výpalu hrubých vrstiev, teplotný profil [20].....	22
Obr. 10 Detailný pohľad na hrubú vrstvu na substráte po výpale [20] [23].....	23
Obr. 11 Hot plates používané pri výrobe polovodičov a na spájkovanie [25] [26].....	24
Obr. 12 Topný prvok hrubej vrstvy tlačený na liste sľudy a kovovom substráte [29] [30]	26
Obr. 13 Flexibilný PTC topný prvok z vodivej gumy [31].....	27
Obr. 14 Schéma regulátora [32].....	27
Obr. 15 Zobrazenie prvého (testovacieho) navrhnutého motívu.....	31
Obr. 16 Znázornený druhý motív meandrového typu	32
Obr. 17 Optimalizovaný návrh motívu	33
Obr. 18 Navrhnuté 3D modely simulovaných odporových motívov	34
Obr. 19 Rozloženie teploty v prípade prvého testovacieho motívu	35
Obr. 20 Zobrazenie rozloženia teploty pri druhom motíve	36
Obr. 21 3D model optimalizovaného topného telesa	36
Obr. 22 Pohľad na rozloženie teploty pri optimalizovanom motíve	37
Obr. 23 Pohľad zhora konštrukcie topnej dosky	38
Obr. 24 Zobrazenie virtuálneho rezu z prednej časti hot plate.....	39
Obr. 25 Prehľadné zobrazenie jednotlivých častí hot plate a ich usporiadanie.....	40
Obr. 26 Schematický návrh procesora ATmega 328P s externým oscilátorom, blokovacími kondenzátormi a ICSP konektorom, pripojenie otočného enkodéru a dodatočne vyvedené vývody z procesora	41
Obr. 27 Zapojenie teplotného čipu MAX6675 s termočlánkom typu K a vývody OLED displeja	42
Obr. 28 Schéma zapojenia napájacieho obvodu a transformované napätie 230 V/9 V	43
Obr. 29 Časť obvodu znázorňujúca spínanie topného telesa pomocou relé.....	43
Obr. 30 3D zobrazenie navrhutej DPS elektronickej časti zariadenia	44
Obr. 31 Duralový profil a uvažované rozmiestnenie jednotlivých častí	45
Obr. 32 Pohľad na zvolený hliníkový plech.....	46
Obr. 33 Národná ukážka otočného enkodéra a OLED displeja [36] [37]	46
Obr. 34 Fotografie pracoviska pri čistení sita	48
Obr. 35 Zobrazenie výsledného vytvoreného motívu na site.....	49
Obr. 36 Grafické rozhranie pece pri zvyšovaní teploty vybraného teplotného profilu	50
Obr. 37 Fotografia upevneného sita na sieťotlačovom zariadení.....	50
Obr. 38 Pozorované chýbajúce miesta pasty na vytlačenej motíve pod mikroskopom	51
Obr. 39 Proces čistenia zvyškov pasty a očistené sito	52
Obr. 40 Fotografia keramických substrátov pripravených na výpal pri vstupe do pece	52
Obr. 41 Znázornenie zmeraných hrúbok vrstvy na rôznych miestach motívu.....	54
Obr. 42 Zobrazené rozloženie teploty na substráte pomocou termokamery	55

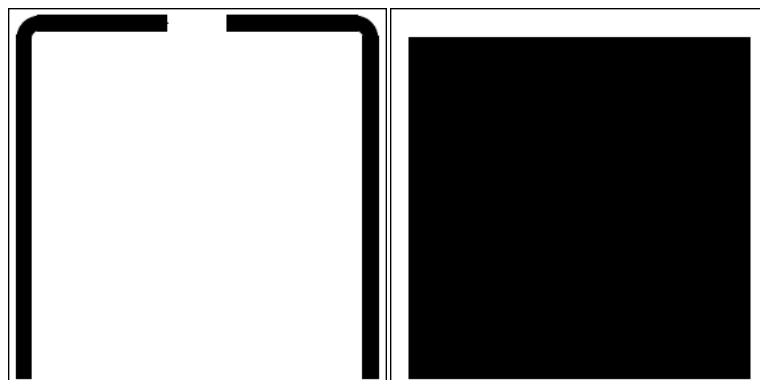
Obr. 43 Prasknutý keramický substrát po prudkom vyhriatí	55
Obr. 44 Rozloženie teploty pri použití výkonnejšieho zdroja napätia	56
Obr. 45 Rozložený keramický substrát pri postupnom zahrievaní	56
Obr. 46 Vyrobená šablóna optimalizovaného motívu.....	57
Obr. 47 Vypálené motívy, pripravené na umiestnenie do konštrukcie	58
Obr. 48 Rozloženie tepla na povrchu substrátu – vľavo rýchle zahriatie na danú teplotu, vpravo postupné vyrovnanie teploty	59
Obr. 49 Vpravo výsledok pokusu – rozlomenie na tri časti, vľavo poškodený substrát zobrazený termokamerou	60
Obr. 50 Model zariadenia vytvorený pre simulácie prestupu tepla.....	61
Obr. 51 Zobrazená sieť simulovaného modelu	62
Obr. 52 Rozloženie tepla na výslednom zariadení bez dištančných stĺpikov	63
Obr. 53 Rozloženie tepla na tele zariadenia s dištančnými stĺpikmi pripevnenými skrútkami...	63
Obr. 54 Rozloženie tepla na zariadení so všetkými uvažovanými prvkami	64
Obr. 55 Zobrazenie výrobného postupu finálneho zariadenia	66
Obr. 56 Upevnenie pružinových kontaktov	67

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Prehľadne uvedené vlastnosti materiálov vodivých pást [10]	14
Tab. 2 Typické vlastnosti odporových pást [10]	15
Tab. 3 Vlastnosti dielektrických (izolačných) pást [10]	16
Tab. 4 Stručný prehľad materiálov substrátov pri hrubovrstvých technológiách [13].....	17
Tab. 5 Dynamické vlastnosti rôznych typov regulátorov [32].....	29
Tab. 6 Zapísané hodnoty napätí a teploty pri záverečnom meraní.....	59
Tab. 7 Zoznam použitých súčiastok na DPS elektronickej časti.....	84
Tab. 8 Zoznam komponentov a použitých materiálov výsledného zariadenia	85

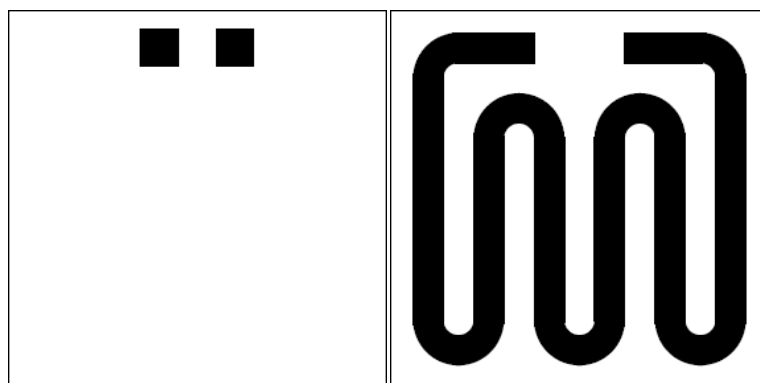
PRÍLOHA A FILMOVÉ PREDLOHY

A.1 Filmová predloha sieťotlače prvého testovacieho motívu



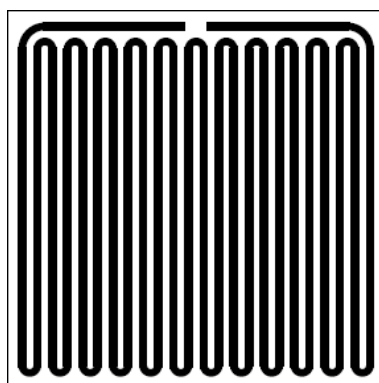
Rozmer oboch častí (vľavo vodivý a vpravo odporový motív) filmových predlôh:
100 x 100 mm, mierka M 1:2

A.2 Filmová predloha sieťotlače druhého testovacieho motívu



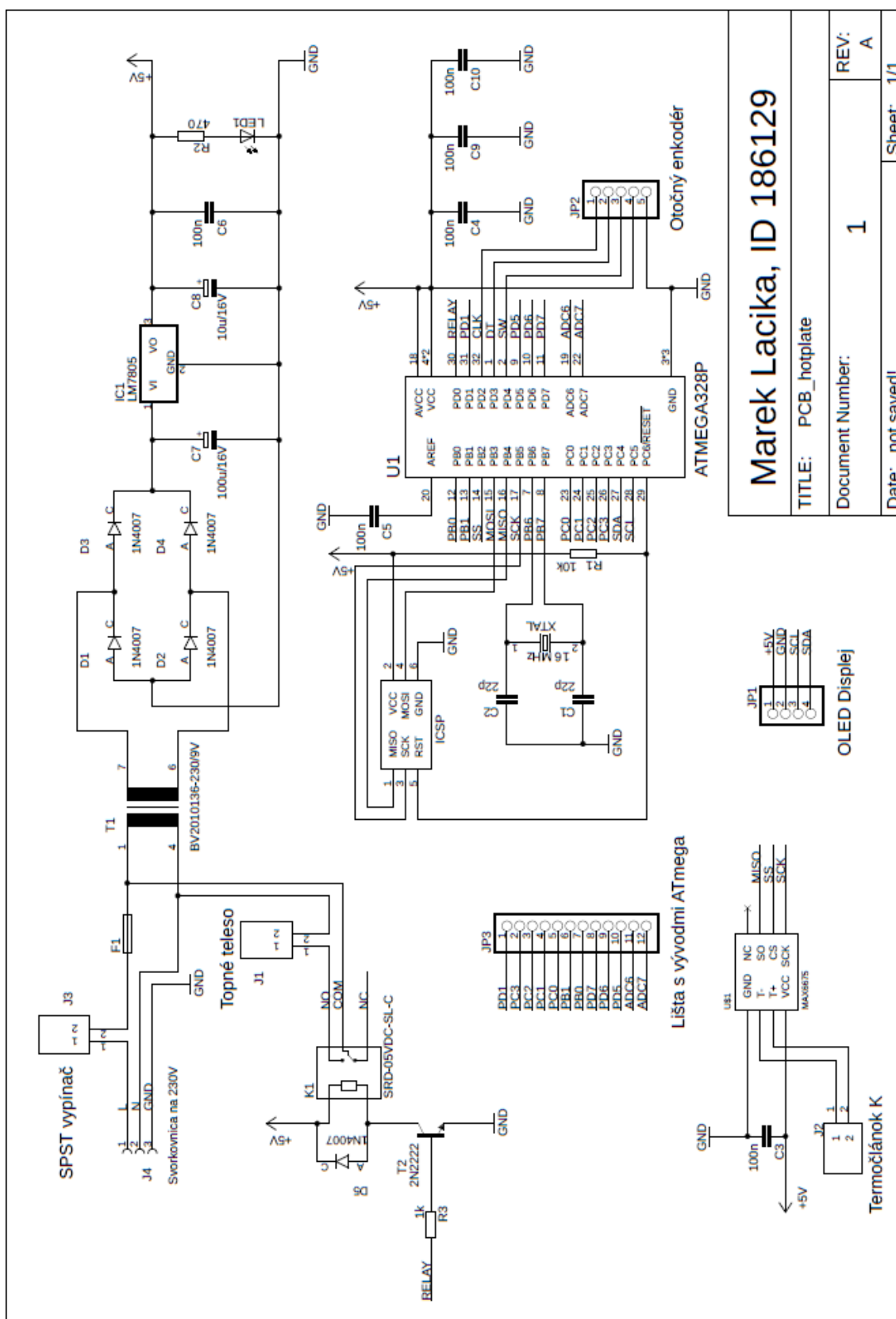
Rozmer oboch častí (vľavo vodivý a vpravo odporový motív) filmových predlôh:
100 x 100 mm, mierka M 1:2

A.3 Filmová predloha sieťotlače optimalizovaného motívu



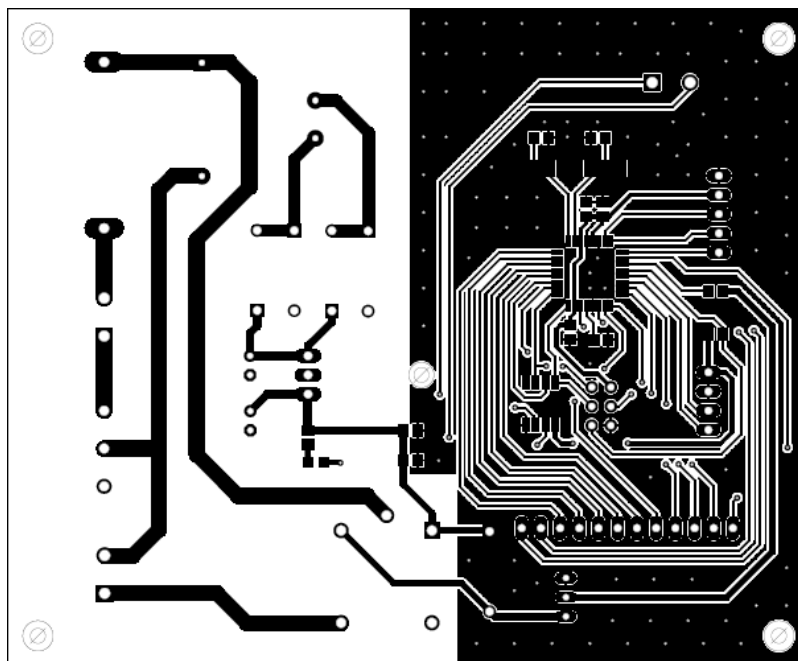
Rozmer filmovej predlohy: 100 x 100 mm, mierka M 1:2

B.1 Schematické zapojenie jednotlivých prvkov elektronickej časti zariadenia



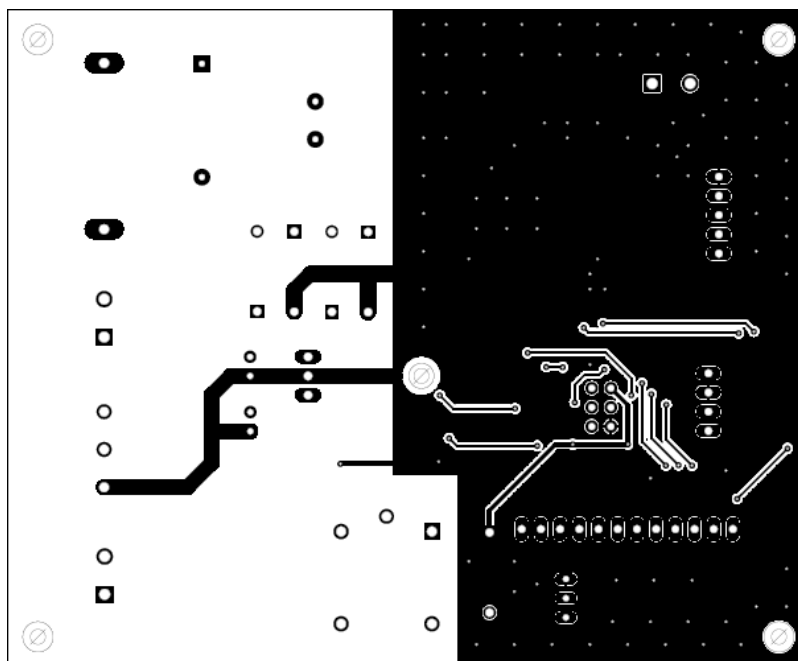
PRÍLOHA C DPS ELEKTRONICKEJ ČASTI

C.1 Návrh DPS elektronickej časti zo strany TOP



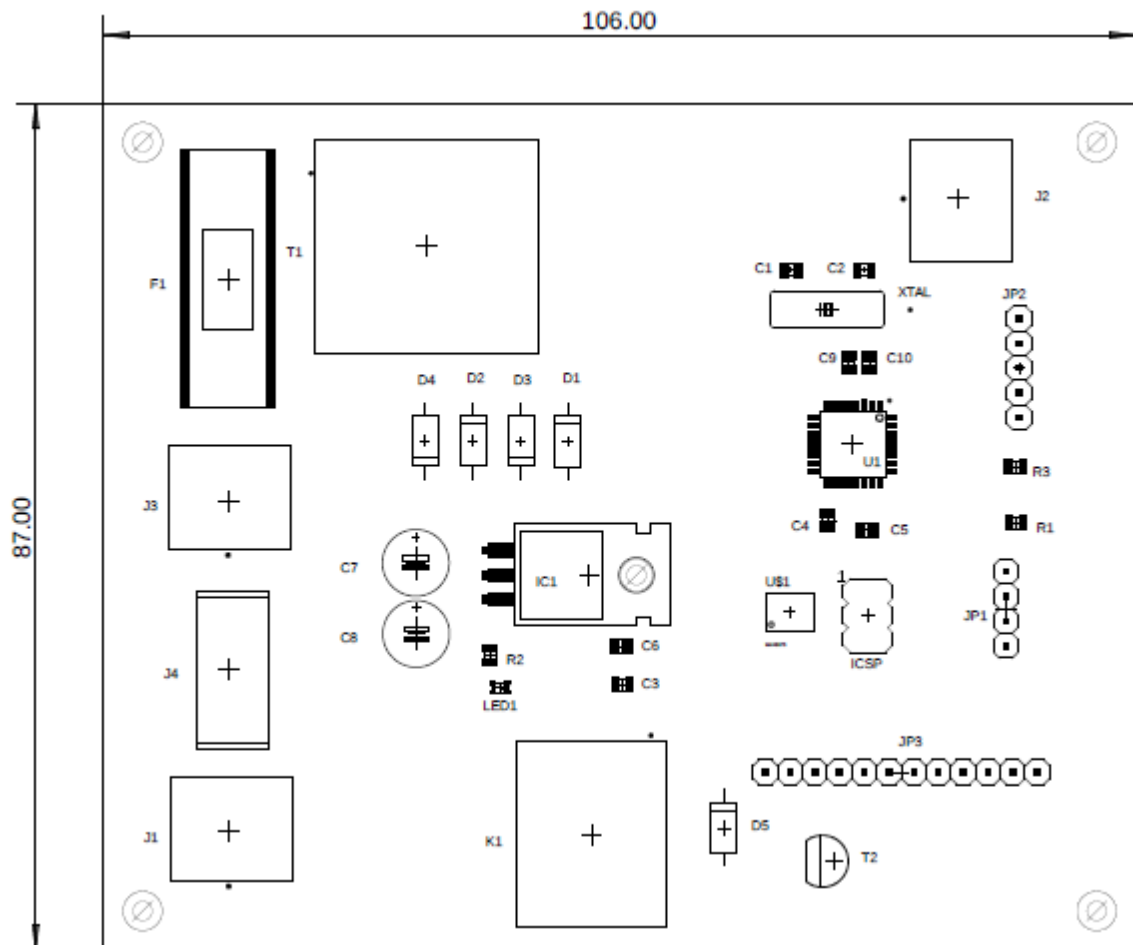
Rozmer dosky plošného spoja: 87 x 106 mm, mierka M 1:1

C.2 Návrh DPS elektronickej časti zo strany BOTTOM



Rozmer dosky plošného spoja: 87 x 106 mm, mierka M 1:1

C.3 Osadzovací plán navrhnuťej DPS



C.4 Zoznam použitých súčiastok na DPS

Tab. 7 Zoznam použitých súčiastok na DPS elektronickej časti

Názov súčiastky	Hodnota	Typ puzdra
C1, C2	22 pF	C0805
C3, C4, C5, C6, C9, C10	100 nF	C0805
C7	100 μ F/16V	Radiálne THT
C8	10 μ F/16V	Radiálne THT
D1, D2, D3, D4, D5	1N4007	DO41
F1	Poistka – 1A	SH22
IC1	LM7805	TO220H
ICSP	AVRISP-6	AVRISP
J1	Topné teleso	Svorkovnica 2 póly, rozteč 5,08 mm
J2	Termočlánok typu K	Svorkovnica 2 póly, rozteč 5,08 mm
J3	SPST vypínač	Svorkovnica 2 póly, rozteč 5,08 mm
J4	Napájanie 230 V	Svorkovnica 3 póly, rozteč 5,08 mm
JP1	OLED displej – 4 vývody	Rozteč 2,54 mm
JP2	Otočný enkodér – 5 vývodov	Rozteč 2,54 mm
JP3	Kolíková lišta – 12 vývodov	Rozteč 2,54 mm
K1	Relé 5V DC/250V AC 10A	SRD-05VDC-SL-C
LED1	LEDSMD	SMD0805
R1	10 k Ω	R0805
R2	470 Ω	R0805
R3	1 k Ω	R0805
T1	EI transformátor do DPS, 1x9 V	BV2010136-230/9V
T2	2N2222	TO92
U\$1	MAX6675	SOIC-8
U1	ATmega328P	QFP80P900X900X120-32N
XTAL	16 MHz	HC49USSMD

C.5 Zoznam všetkých komponentov zariadenia

Tab. 8 Zoznam komponentov a použitých materiálov výsledného zariadenia

Názov komponentu	Dodávateľ/výrobca	Približná/odhadovaná cena
Elektronické súčiastky	Mouser Electronics, GM electronic, spol. s.r.o.	900 Kč
DPS	Gatema, a.s.	950 Kč
Materiály na osadenie DPS (tavidlo, spájka) ¹	AMTECH, CYNEL	500 Kč
Duralový profil ²	Sanmina [®]	0 Kč
Hliníkový plech ²	KOVO P+P, s.r.o.	0 Kč
Konštrukčné doplnky (upevňovacie dištančné stĺpiky, plastové nožičky, pružinové kontakty)	GM electronic, spol. s.r.o.	400 Kč
Keramické substráty a vodivá pasta	ELCERAM, a.s., ESL	350 Kč
Kabeláž (prepojovacie vodiče, napájací kábel) a vypínač ²	Sanmina [®]	0 Kč
Izolácia ^{1, 2}	FAST VUT	0 Kč
Lepidlá (tepelne vodivé a izolačné) ¹	P-D Refractories CZ a. s.	500 Kč

¹ V prípade odhadovanej ceny je vzaté v úvahu to, že je možné kúpiť 1 ks, resp. balenie daného materiálu

² Odhad ceny 0 Kč znamená, že daný materiál bol darom, prípadne za normálnych okolností by bol odpadom